



**Miguel Alexandre Ferreira Mousinho**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Estudo do comportamento ao desgaste de uma engrenagem helicoidal**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro  
Cardoso Martins Morgado, Professora Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado

Arguente: Prof. Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões

Vogal: Prof. Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro de 2017**



**Estudo do comportamento ao desgaste de uma engrenagem helicoidal**

**Copyright © 2017 Miguel Alexandre Ferreira Mousinho**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado, o facto de me ter convidado para a realização deste tema de dissertação, pelo apoio, disponibilidade e transmissão e partilha de conhecimentos ao longo dos meses de realização desta dissertação.

Ao Mestre David Figueiredo Nunes Braga, da SEW Eurodrive Portugal, por ter disponibilizado as engrenagens e os lubrificantes essenciais à realização deste estudo e partilha de conhecimento técnico.

Ao Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira a ajuda essencial na programação do *software* Labview e pelo conhecimento partilhado sobre desgaste.

Ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, técnicos dos Laboratórios de Processamento Mecânico de Materiais, Processamento Térmico de Materiais e Caracterização de Materiais, toda a ajuda que me deram durante a realização da parte experimental da minha dissertação.

À Professora Carla Maria Moreira Machado a disponibilidade e ajuda com a utilização do rugosímetro Marh MarSurf PS10.

Ao meu colega do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Ricardo Paulo a sua ajuda, apoio e amizade demonstrada durante os meses da realização desta tese.

À empresa 4x4 Multi Trabalhos, Lda., em Setúbal, na pessoa do meu colega de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Nuno Santos, pela oferta do corte das amostras, com recurso à máquina de corte por jato de água, para a realização da parte experimental da minha dissertação.

Ao Professor Doutor Alexandre José da Costa Velhinho a disponibilidade para o auxílio com o microscópio ótico invertido do Laboratório de Microscopia Ótica do CENIMAT, para a realização de análise e contagem de defeitos, e, também, pela ajuda na análise metalográfica do material.

Ao meu colega do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Luís Patrício a ajuda com a programação do código em Matlab para o tratamento de dados dos resultados dos ensaios de desgaste.

Aos meus colegas Diogo Ferreira, Carlos Simão e Samuel Simões o apoio e a amizade durante todo o curso.

Por último, agradecer aos meus pais, ao meu irmão e à Diana todo o apoio que me deram e que foi fundamental para a conclusão do curso.



## RESUMO

Esta dissertação teve como base o estudo de causas de desgaste de uma engrenagem mecânica de dentes helicoidais. Inicialmente, foi efetuado um levantamento do Estado de Arte, com uma introdução sobre engrenagens, o seu processo de fabrico e seus defeitos associados e as principais causas de falha em engrenagens e onde é aprofundado as suas características e estudos feito.

Na parte experimental foram incluídos os processos tecnológicos de preparação das amostras a partir de peças reais, em aço DIN 16MnCr5, do par de engrenagens helicoidais. Este par de engrenagens apresentava problemas de fraturas dos dentes.

Com o intuito de esclarecer as causas de fratura, foram realizados ensaios de micro dureza Vickers e executado um estudo aprofundado de duas zonas do material em questão: análise de dureza do material que compõe o corpo da engrenagem e análise da dureza dos dentes na zona de cabeça do dente (zona de contacto) e estudo da dureza ao longo do perfil do dente.

Foi efetuado também um estudo da distribuição de defeitos de fabrico em profundidade, em 4 amostras da engrenagem, onde foram feitas contagem do número de defeitos, e respetivas áreas, através de tratamento de imagens obtidas por microscópio ótico invertido.

Por último, foram efetuados ensaios de desgaste no material e caracterizado o seu comportamento ao desgaste a seco e com lubrificante usado, com recurso a uma máquina de testes *pin-on-disc*.

### **Palavras-Chave**

Engrenagens; Dureza; Defeitos de fabrico; Testes *pin-on-disc*; Desgaste; Aço DIN 16MnCr5



## ABSTRACT

This dissertation was based on the study of causes of wear in a helical mechanical gear. Initially, a review of the State of Art was carried out, with an introduction about gears, its manufacturing process and associated defects and the main causes of failure in gears and where it is approached its characteristics and studies done.

In the experimental part were included the technological processes of preparation of samples from real parts, in DIN 16MnCr5 steel of the pair of helical gears. This pair of gears had teeth fracture problems.

To clarify the causes of fracture, Vickers micro hardness tests were carried out and an in-depth study of two zones of the material in question was studied: hardness analysis of the material composing the gear body and analysis of the hardness of the teeth in the area of head of the tooth (contact zone) and study of the hardness along the profile of the tooth.

A study of the distribution of defects in depth in 4 gear samples was carried out, where the number of defects were counted and the respective areas were measured by treatment of images obtained by inverted optical microscope.

Finally, wear tests were carried out on the material and its behavior on dry wear and used lubricant was evaluated using a pin-on-disc test machine.

### **Keywords:**

Gears; Hardness; Manufacturing Defects; Pin-on-disc Testing; Wear; Steel DIN 16MnCr5



# ÍNDICE

Agradecimentos.....	I
Resumo .....	III
Abstract.....	V
Índice de figuras.....	IX
Índice de tabelas.....	XIII
Lista de siglas.....	XV
Lista de símbolos.....	XVII
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Estrutura da Dissertação .....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Engrenagens .....	3
2.1.1 Tipos de engrenagens .....	3
2.1.2 Características das engrenagens.....	4
2.2 Processo de fabrico.....	6
2.3 Modos de falhas mais comuns em engrenagens.....	8
2.3.1 Desgaste .....	8
2.3.2 Scuffing .....	10
2.3.3 Micro picagem.....	11
2.3.4 Picagem .....	12
3 Metodologia Experimental .....	15
3.1 Enquadramento.....	15
3.2 Conjunto de engrenagens a analisar.....	15
3.3 Ensaios de micro dureza Vickers.....	17
3.3.1 Procedimento experimental .....	17
3.3.2 Tratamento de dados.....	22
3.4 Análise de defeitos .....	25
3.5 Ensaios de desgaste .....	26
3.5.1 Procedimento experimental .....	27
3.5.2 Determinação da força máxima possível exercer na engrenagem helicoidal em estudo	32
3.5.3 Calibração dos equipamentos .....	34
3.5.4 Melhoramento da caixa isoladora da máquina de desgaste .....	37
4 Apresentação e discussão de resultados experimentais.....	39
4.1 Ensaios de microdureza Vickers.....	39

4.1.1	Corpo roda dentada.....	39
4.1.2	Dentes roda dentada.....	41
4.2	Análise de defeitos .....	47
4.3	Ensaio de desgaste .....	50
4.3.1	Ensaio realizado a seco .....	50
4.3.2	Ensaio realizado com lubrificante usado.....	56
5	Conclusões e propostas de trabalhos futuros .....	61
6	Referências Bibliográficas.....	63
7	Anexo A .....	65
8	Anexo B .....	67
9	Anexo C .....	69
10	Anexo D .....	71

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de engrenagens cilíndricas de dentes retos [4].....	3
Figura 2.2 – Representação de engrenagens de dentes helicoidais [4].....	3
Figura 2.3 – Representação de engrenagens cónicas [4].....	4
Figura 2.4 – Representação de engrenagem de parafuso de rosca sem fim [4].....	4
Figura 2.5 – Nomenclatura dos dentes de uma engrenagem de dentes retos [5].....	5
Figura 2.6 - Ilustração das condições de rolamento e deslizamento nos dentes de engrenagens [6].....	6
Figura 2.7 – Representação do processo de fundição em areia [7].....	6
Figura 2.8 - Cavidades presentes numa peça fundida [10].....	7
Figura 2.9 – Fenómeno de desgaste por abrasão nos dentes de uma engrenagem de dentes retos [11]...8	
Figura 2.10 – Fenómeno de scuffing numa engrenagem de dentes retos [11].....	10
Figura 2.11 - Fenómeno de micro picagem numa engrenagem de dentes retos [11].....	11
Figura 2.12 - Fenómeno de picagem numa engrenagem de dentes retos [11].....	12
Figura 3.1 - Par de engrenagens em estudo: (1) Roda dentada; (2) veio pinhão.....	15
Figura 3.2 - Microestrutura do aço DIN 16MnCr5.....	16
Figura 3.3 - Representação da geometria de um indentador Vickers (Adaptado) [29].....	17
Figura 3.4 - (a) Espaçamento mínimo recomendado para indentações de Vickers (adaptado) [29]; (b) Mitutoyo HM 112.....	18
Figura 3.5 - Roda dentada de dentes helicoidais.....	18
Figura 3.6 - Desenhos e localização dos cortes feitos na roda dentada, com recurso a jato de água, em ficheiro .dxf: (1) Corte de amostras cilíndricas de diâmetro 25mm; (2) Corte de duas secções dentes.....	19
Figura 3.7 - Cortes efetuados na roda dentada helicoidal.....	19
Figura 3.8 - Amostras retiradas da parte interior da roda dentada.....	19
Figura 3.9 - Amostras retiradas de dentes para análise.....	20
Figura 3.10 - a) Cilindros separados para obter amostras; b) serra automática GBS-218 Eco AutoCut.....	20
Figura 3.11 – (a) Exemplo da obtenção da amostra C3; (b) superfície analisada da amostra C3.....	20
Figura 3.12 - Exemplo de corte de dentes para ensaios de dureza.....	21
Figura 3.13 - Exemplo de amostras colocadas em molde com resina epóxi para polimento.....	21
Figura 3.14 - Máquina de polimento Buehler Phoenix Alpha.....	22
Figura 3.15 - Gráfico de probabilidade para a amostra B2.....	22
Figura 3.16 - Gráfico de probabilidade para a amostra B3.....	23
Figura 3.17 - Gráfico de probabilidade da amostra C3.....	23
Figura 3.18 - Gráfico de probabilidade do dente A.....	24
Figura 3.19 - Gráfico de probabilidade do dente B.....	24
Figura 3.20 - Gráfico de probabilidade do dente C.....	24
Figura 3.21 - Corte das amostras A1 a A4 para análise de defeitos.....	25

Figura 3.22 - (a) amostra A1; (b) fotografia através da tecnologia multistep de zona em análise; (c) exemplo de fotografia para análise de defeitos; (d) imagem contrastada pelo software ImageJ para análise de defeitos .....	25
Figura 3.23 - Ilustração de dispositivo de pin-on-disc [26] .....	26
Figura 3.24 - (a) Um dos cilindros retirados da engrenagem para amostras; (b) amostras para desgaste e um dos pinos utilizados .....	27
Figura 3.25 - (a) Torneamento de amostras cilíndricas para obtenção de pinos; (b) Torno Optimum D 460 x 1500.....	27
Figura 3.26 - Caudalímetro da botija de gás a debitar argon a 5 l/min durante a realização de um ensaio .....	28
Figura 3.27 – (a) furação da ponta do pino para inserção do termopar tipo K; (b) pormenor do furo realizado; (c) engenho de furar Pirra Estremoz utilizado.....	28
Figura 3.28 - (a) termopar tipo K; (b) massa térmica de óxido metálico e fita isolante Kapton.....	29
Figura 3.29 - (a) exemplo de retificação da amostra C1; (b) retificadora Sunlike SSG-2550AH .....	29
Figura 3.30 - (a) medição da rugosidade média com rugosímetro; (b) identificação das 3 direções na amostra.....	29
Figura 3.31 - (a) suporte para amostra na máquina pin-on-disc; (b) modelação 3D de suporte com entalhe para amostra; (c) impressora 3D Ultimaker Extended .....	30
Figura 3.32 - Balança AND GR-200 .....	31
Figura 3.33 - Controlador SEW Movitrac .....	31
Figura 3.34 - Microscópio Olympus CX40 e camara digital Olympus DP21 .....	32
Figura 3.35 - Forças entre dentes atuando sobre uma engrenagem cilíndrica helicoidal de mão direita [4] .....	33
Figura 3.36 - Determinação do ângulo de hélice $\psi$ .....	33
Figura 3.37 –Máquina de testes pin-on-disc .....	34
Figura 3.38 - (1) Chassis SCXI-1000; (2) Placa SCXI-1112; (3) Placa SCXI-1314.....	34
Figura 3.39 – Procedimento experimental de calibração da célula de carga: (a) força F aplicada na célula de carga; (b) esquema dos pesos impostos no sistema que exercem a força F.....	35
Figura 3.40 - Retas de calibração da célula de carga.....	35
Figura 3.41 - Calibração do termopar.....	36
Figura 3.42 - Retas de calibração do termopar tipo K.....	36
Figura 3.43 - (a) Pormenor da vedação com silicone; (b) Porta apoiada com dobradiças na parte inferior e batente na parte superior .....	37
Figura 3.44 - Isolamento da porta com fita de calafetagem e vista da caixa na sua posição de serviço	38
Figura 4.1 - Identificação da zona indentada na amostra B2 e eixo de coordenadas considerado.....	39
Figura 4.2 - Identificação da zona indentada na amostra B3 e respetivo eixo de coordenadas .....	40
Figura 4.3 - Identificação da zona indentada na amostra C3 e respetivo eixo de coordenadas .....	40

Figura 4.4 - Identificação da zona indentada no dente A e respetivo eixo de coordenadas .....	41
Figura 4.5 - Identificação da zona indentada no dente B e respetivo eixo de coordenadas .....	42
Figura 4.6 - Identificação da zona indentada no dente C e respetivo eixo de coordenadas .....	42
Figura 4.7 - Fissuras nos dentes da engrenagem.....	43
Figura 4.8 - Identificação da zona da indentação no dente E: (a) – dente E com a zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração .....	44
Figura 4.9 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente E.....	44
Figura 4.10 - Identificação da zona da indentação no dente F: (a) – dente F com a zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração .....	45
Figura 4.11 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente F.....	45
Figura 4.12 - Identificação da zona da indentação no dente H: (a) – dente H com a zona zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração .....	46
Figura 4.13 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente H.....	46
Figura 4.14 - Defeitos observados na amostra A1 .....	47
Figura 4.15 - Defeitos observados na amostra A2 .....	47
Figura 4.16 - Defeitos observados na amostra A3 .....	48
Figura 4.17 - Defeitos observados na amostra A4 .....	48
Figura 4.18 – Exemplo de riscos provenientes de polimento mecânico. (a) imagem retirada de microscópio ótico invertido; (b) imagem com threshold .....	49
Figura 4.19 - Exemplo de sujidades presentes numa amostra: (a) imagem retirada de microscópio ótico invertido; (b) imagem com threshold .....	49
Figura 4.20 - Perda de volume na amostra e no pino, com carga aplicada de 41.14N, durante 50 minutos (Ensaio-1) .....	50
Figura 4.21 - Observações feitas à mesma zona da pista de desgaste durante o Ensaio-1: (a) início do ensaio; (b) 10 minutos; (c) 20 minutos; (d) 30 minutos e (e) 40 minutos .....	51
Figura 4.22 - Observações feitas ao pino durante o Ensaio-1: (a) início do ensaio; (b) 10 minutos; (c) 20 minutos; (d) 30 minutos e (e) 40 minutos.....	52
Figura 4.23 - Perda de volume da amostra e do pino em relação à carga aplicada, durante 40 minutos (Ensaio-2) .....	53
Figura 4.24 - Ensaio a seco com carga aplicada de 16,93N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino.....	54
Figura 4.25 - Ensaio a seco com carga aplicada de 30,84N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino.....	54

Figura 4.26 - Ensaio a seco com carga aplicada de 34,35N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino.....	54
Figura 4.27 - Ensaio a seco com carga aplicada de 41,14N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino.....	54
Figura 4.28 - Força de atrito registada em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaios 2.....	55
Figura 4.29 - Coeficiente de atrito registado em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaios 2 .....	55
Figura 4.30 - Temperatura em zona próxima da ponta do pino em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaios 2 .....	56
Figura 4.31 - Força de atrito registada nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4 .....	58
Figura 4.32 - Coeficiente de atrito registado nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4.....	58
Figura 4.33 - Temperatura na zona perto da ponta do pino nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4.....	58
Figura 4.34 - (a) superfície da amostra B1 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra B1 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio .....	59
Figura 4.35 - a) superfície da amostra B4 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra B4 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio .....	59
Figura 4.36 - a) superfície da amostra H4 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra H4 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio .....	60
Anexo A - Painel principal do software Labview usado para adquirir os dados da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura perto da ponta do pino .....	65
Anexo B - Diagrama de blocos do programa em Labview para aquisição de dados da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura perto da ponta do pino .....	67
Anexo C - Código utilizado em Matlab para tratamento de dados nos ensaios de desgaste .....	69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química do aço DIN 16MnCr5 [27] .....	15
Tabela 3.2 - Rugosidade média da amostra E4 antes e depois de retificação para a realização do primeiro ensaio .....	30
Tabela 3.3 - Rugosidade média da amostra E4 e E1 antes da realização do segundo ensaio .....	30
Tabela 3.4 - Rugosidade média das amostras B4, B1 e H4 antes e depois da retificação para a realização de ensaios com lubrificante usado .....	30
Tabela 4.1 - Resultados de dureza Vickers da amostra B2 .....	39
Tabela 4.2 - Resultados de dureza Vickers da amostra B3 .....	40
Tabela 4.3 - Resultados de dureza Vickers da amostra C3 .....	40
Tabela 4.4 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente A .....	41
Tabela 4.5 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente B .....	42
Tabela 4.6 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente C .....	43
Tabela 4.7 - Valores de massa iniciais e finais e perdas de volume registados nas amostras B1, B4 e H4 e no pino.....	56
Tabela 10.1 – Anexo D: Dados relativos à extensão recolhidos para a elaboração da reta de calibração .....	71
Tabela 10.2 – Anexo D: Dados relativos às temperaturas do termopar e do termómetro para elaboração da reta de calibração do termopar.....	71



## LISTA DE SIGLAS

ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CENIMAT	Centro de Investigação em Materiais da FCT/UNL
CM	Caracterização de Materiais
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EF	Elementos Finitos
EN	<i>European Standard</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FC	Fator de Calibração
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
HRC	Dureza de Rockwell na escala C
HV	Dureza de Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PLA	Poliácido Láctico
PMM	Processamento Mecânico de Materiais
PTM	Processamento Térmico de Materiais
UNL	Universidade Nova de Lisboa



## LISTA DE SÍMBOLOS

$p$	passo primitivo [mm]
$m$	módulo [mm]
$d$	diâmetro primitivo [mm]
$h_a$	altura de cabeça [mm]
$h_f$	altura de pé [mm]
$V$	volume de material removido [m <sup>3</sup> ]
$W$	carga aplicada [N]
$H$	dureza da superfície [Pa]
$K$	coeficiente de desgaste
$h$	profundidade de desgaste [m]
$p_c$	pressão de contacto [Pa]
$s$	distância de contacto [m]
$d_1$	primeira diagonal de Vickers [μm]
$d_2$	segunda diagonal de Vickers [μm]
$dV$	diagonal de Vickers [mm]
$p\text{-value}$	valor de probabilidade
$\alpha$	valor de confiança
$\omega$	velocidade angular da amostra [rot/min]
$t$	período de tempo [min]
$F_N$	carga aplicada no pino [N]
$R$	raio interior [mm]
$R_a$	rugosidade superficial media [μm]
$F$	força total de serviço exercida no dente da engrenagem [N]
$F_r$	força radial exercida no dente da engrenagem [N]
$F_t$	força tangencial exercida no dente da engrenagem [N]
$F_a$	força axial exercida no dente da engrenagem [N]
$\phi_n$	ângulo de pressão normal [°]
$\phi_t$	ângulo de pressão tangencial [°]
$\psi$	ângulo de hélice [°]
$P$	potência transmitida [W]
$n$	velocidade de rotação [rot/min]
$B$	binário aplicado [Nm]
$F_n$	força normal efetuada na amostra [N]
$F_A$	força de atrito [N]
$\mu_A$	coeficiente de atrito entre a superfície e a amostra

$T_p$	temperatura em zona próxima da ponta do pino [°C]
$\Delta V_a$	perda de volume na amostra [mm <sup>3</sup> ]
$\Delta V_p$	perda de volume no pino [mm <sup>3</sup> ]

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Após a Revolução Industrial, iniciada em Inglaterra no século XVIII, assistiu-se a uma grande explosão no uso de engrenagens metálicas, a que se seguiu, durante o século XIX, um rápido desenvolvimento no projeto e na tecnologia do fabrico de engrenagens.

As engrenagens desempenham um papel fundamental na tecnologia moderna. Estas transferem potência e movimento, com alta eficiência, e aparecem em vários tipos de máquina e sistemas de controlo. A interação entre os dentes das engrenagens pode ser afetada negativamente pelo desgaste, causando uma taxa de transmissão não uniforme, aumentando os efeitos dinâmicos, diminuindo a eficiência e aumentando a possibilidade da ocorrência de falha nos dentes [1].

Em elementos acoplados, sem superfícies conformes, como no caso das engrenagens, podem ser originadas altas pressões de contacto, mesmo sujeitos apenas a cargas moderadas, devido à pequena dimensão da área de contacto [2].

Raramente ocorre uma rotura total numa engrenagem. No entanto, esta situação verifica-se quando se dá a fratura de um ou mais dentes na engrenagem, o que impossibilita a transmissão de movimento entre os dois elementos do par, ou quando os danos criados nos dentes são tão elevados que a vibração e o ruído se tornam inaceitáveis. Assim, os dentes danificados devem ser observados e analisados os tipos de danos e as suas causas.

No âmbito desta tese, foi estudado, através de ensaios laboratoriais, durezas e o desgaste de amostras obtidas de uma engrenagem de dentes helicoidais, de aço DIN 16MnCr5, com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico deste órgão de máquina.

## 1.2 OBJETIVOS

Este tema de dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento do aço DIN 16MnCr5 da engrenagem mecânica da empresa SEW – Eurodrive, tendo em conta as condições de serviço a que esteve sujeita, determinando laboratorialmente as causas de deterioração deste material, através do estudo das durezas, do desgaste e dos defeitos de fabrico, considerando cada característica separadamente.

As condições de funcionamento ao serviço são: a potência do motor que aciona este redutor de 5,5 kW a 1500 rpm, a relação de transmissão do redutor de 27,88 e o binário no veio de saída deste redutor de 800 N.m a 50 rpm.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura desta dissertação é constituída por cinco capítulos de desenvolvimento e quatro anexos com informação complementar da parte experimental.

No presente capítulo, é apresentado um resumo da estrutura desta tese. O segundo consistiu num levantamento do estado da arte que permitiu a construção de uma estrutura de conhecimento relativo ao efeito das variáveis relevantes, designadamente (i) os tipos de engrenagens existentes e suas características, (ii) o processo de fabrico de engrenagens, (iii) os defeitos intrínsecos ao processo de fabrico, (iv) estudo dos problemas de fratura existentes neste tipo de elemento de máquina.

Seguiu-se a descrição do desenvolvimento experimental no capítulo 3, subdividido em 3 fases. A primeira consistiu em caracterizar, através de ensaios de micro dureza Vickers, a dureza tanto do material da zona do corpo da engrenagem, como o material da zona dos dentes da mesma. Em relação aos dentes, a pesquisa incidiu na dureza da zona de contacto entre dentes, bem como a zona de perfil do dente, com o objetivo de relacionar os resultados obtidos com as fraturas apresentadas pela engrenagem nos dentes. A análise de defeitos do material, através de imagens de amostras polidas, com o recurso ao *software* de tratamento de imagem, ImageJ, constitui a segunda fase deste terceiro capítulo, tendo sido possível fazer contagem de defeitos e respetivas áreas, em material da zona do corpo da roda dentada. Na última fase do estudo experimental realizaram-se os ensaios de desgaste que consistiram em determinar os parâmetros de desgaste no caso mais severo de operação, ou seja, a seco; preparação de amostras para ensaios de desgaste, através da retificação da superfície das mesmas; realização de ensaios de desgaste a seco, onde se procurou compreender o comportamento do material ao longo de vários períodos de tempo e a variações de cargas impostas; ensaios de desgaste com lubrificante usado, procurando esclarecer o comportamento do material, com o objetivo de relacionar os dados obtidos com o caso de estudo considerado.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados referentes aos ensaios experimentais descritos no capítulo 3.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 ENGRENAGENS

Segundo o autor Childs [3], por definição, engrenagens são rodas cilíndricas dentadas usadas para transmitir potência mecânica de um veio rotativo para outro.

#### 2.1.1 Tipos de engrenagens

De acordo com Budynas e Keith [4], existem os seguintes tipos de engrenagens:

- Engrenagens cilíndricas de dentes retos, em que é verificável que os dentes são paralelos ao seu eixo de rotação e são usadas para transmitir movimento de um veio para outro, posicionados paralelamente (figura 2.1).

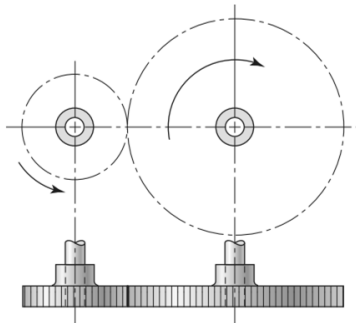


Figura 2.1 – Representação de engrenagens cilíndricas de dentes retos [4]

- Engrenagens de dentes helicoidais apresentam os seus dentes inclinados em relação ao seu eixo de rotação. Têm como função transmitir movimento entre eixos paralelos e não paralelos (figura 2.2).

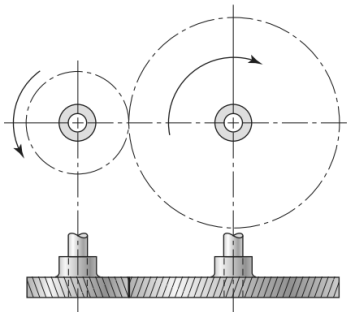


Figura 2.2 – Representação de engrenagens de dentes helicoidais [4]

- Engrenagens cónicas, tal como o nome indica, os seus dentes formam superfícies cónicas, e são na sua maioria aplicadas para transmitir movimento entre eixos que se interseçam (figura 2.3).

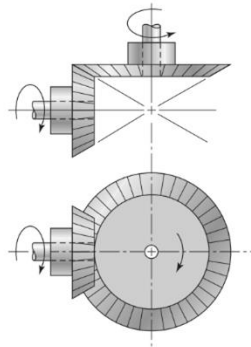


Figura 2.3 – Representação de engrenagens cónicas [4]

- Engrenagens de parafuso de rosca sem fim, consiste numa engrenagem sob a forma de um parafuso sem fim, que ao rodar sobre os dentes de outra engrenagem transmite movimento entre eixos não paralelos e não intersecantes (figura 2.4).

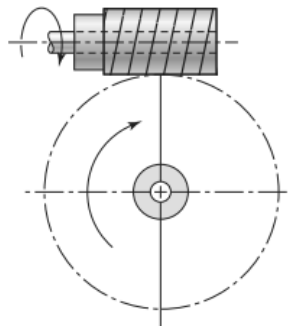


Figura 2.4 – Representação de engrenagem de parafuso de rosca sem fim [4]

### 2.1.2 Características das engrenagens

Os autores Meneghetti, Terrin & Giancometti [2] identificam os seguintes fatores como sendo as principais influências para a existência de fadiga de contacto em engrenagens:

- Geometria – os raios de curvatura das superfícies de contacto determinam tanto a forma como a dimensão da área de contacto. Assim, para uma dada força, a pressão de contacto máxima e os gradientes de tensão são fortemente influenciados pela geometria dos corpos que estarão em contacto.
- Material – composição, tensão residual e microestrutura.
- Lubrificante – como o contacto entre as asperezas das superfícies é indesejável, devido ao aumento de concentração de tensões, uma camada de lubrificante é necessário para manter as respetivas superfícies de contacto separadas.

- Velocidade – altas velocidades de escorregamento levam ao sobreaquecimento do lubrificante, reduzindo assim a sua viscosidade.
- Acabamento superficial – quanto mais alta a rugosidade superficial, mais necessária se torna a espessura de película de lubrificante para evitar o contacto entre as duas superfícies.

Os autores Branco et al [5] descrevem a geometria de uma engrenagem de dentes retos, de acordo com a figura 2.5.

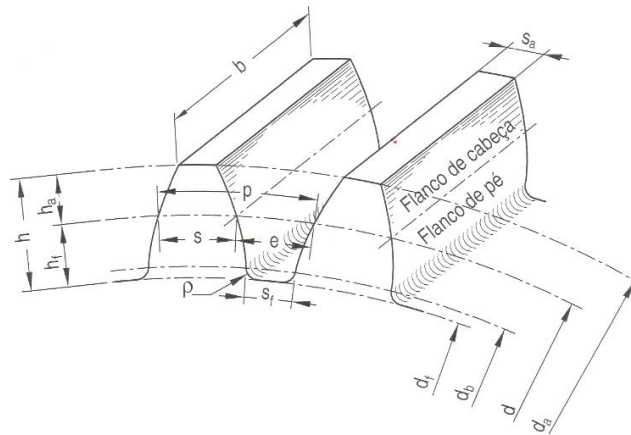


Figura 2.5 – Nomenclatura dos dentes de uma engrenagem de dentes retos [5]

Sendo que o passo primitivo  $p$  [mm] (ver figura 2.5) é a distância entre o ponto num dente relativamente ao ponto correspondente no dente adjacente, e é dado pela equação (1) [4]:

$$p = \pi m = \frac{\pi d}{N} \quad (1)$$

Onde  $m$  é o módulo [mm] e  $d$  é o diâmetro primitivo [mm]. O módulo representa o rácio entre o diâmetro do passo e o número de dentes.

O diâmetro primitivo  $d$  (ver figura 2.5) está associado ao círculo primitivo, que diz respeito a um círculo teórico, sobre o qual todos os cálculos efetuados se baseiam.

E ainda, altura da cabeça ( $h_a$ ) [mm] é a distancia radial do passo primitivo para o topo do dente e altura de pé ( $h_f$ ) [mm] é a distancia radial do passo primitivo para a parte inferior do dente (ver figura 2.5).

Os flancos das engrenagens estão sujeitos a variações de carregamento e a condições de escorregamento relativos, quando o par de dentes é posto em movimento, ao longo da sua linha de ação, devido à variação de raio do perfil da curvatura do dente, em diferentes pontos de contacto [6].

Durante o seu funcionamento, os dentes das engrenagens estão sujeitos a uma combinação complexa entre contacto de rolamento e de deslizamento, como é ilustrado na figura 2.6, que varia ao longo do flanco do dente [6].

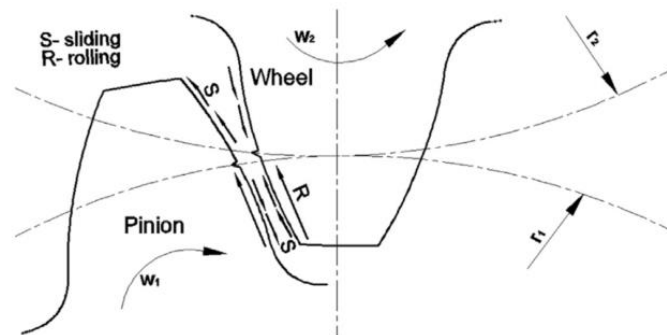


Figura 2.6 - Ilustração das condições de rolamento e deslizamento nos dentes de engrenagens [6]

## 2.2 PROCESSO DE FABRICO

Para a produção de engrenagens, o processo mais adequado é a fundição por moldação em areia e maquinação. Esta escolha deve-se ao facto de este ser um processo apropriado para a produção de peças complexas, algumas de grande peso e dimensões, o que implica ser mais fácil a sua produção em série, levando a que seja, em muitos casos, economicamente mais atrativa.

A fundição por moldação em areia é um dos métodos de fundição mais antigos que existem. É utilizada a moldação em areia, para o fabrico de peças complexas, produzidas de ligas metálicas com um ponto de fusão muito elevado, como aços, titânio e níquel.

O processo consiste em vazar o metal fundido na cavidade da moldação (molde), com a forma da peça final desejada (figura 2.7), solidificando dentro da moldação. Posteriormente, a moldação em areia é desfeita, e a peça final é retirada. Segue a limpeza por decapagem, corte do sistema de gitagem, tratamentos térmicos, maquinação e, por fim, controlo de qualidade.

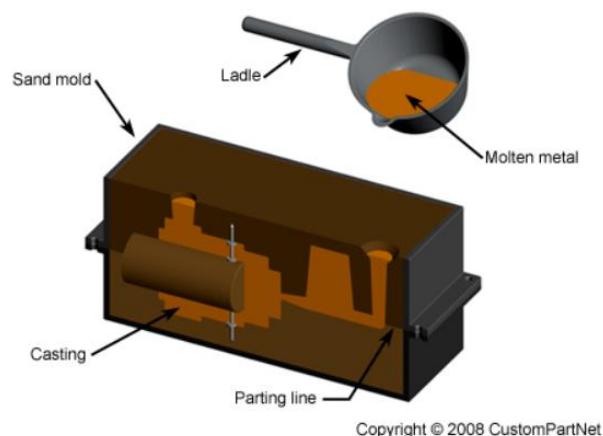


Figura 2.7 – Representação do processo de fundição em areia [7]

O uso de areia como material de moldação oferece benefícios ao processo, como o facto de ser de baixo custo e apresentar uma alta temperatura de fusão além de ser reutilizável [7].

A principal vantagem deste processo de fabrico deve-se ao facto de quase todos os metais poderem ser vazados e não haver praticamente limite no que diz respeito ao tamanho, forma ou peso da peça que se pretende obter [8].

De acordo com ASM International [9], o Comité Internacional de Associações Técnicas de Fundição criou uma normalização para a nomenclatura dos defeitos inerentes ao processo de fundição como é o exemplo das:

- Cavidades – geralmente de forma arredondada, denominam-se de *blowholes* e *pinholes* (figura 2.8). Podem aparecer em qual zona da peça e são causados devido ao gás que fica “preso” no metal, quando este solidifica [10].
- Descontinuidades – Fraturas, ruturas [9].
- Inclusões/anomalias na estrutura – material alheio à liga que foi vertida e que ficou “preso” no seu interior [9].

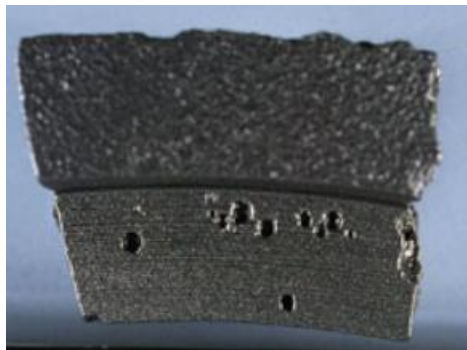


Figura 2.8 - Cavidades presentes numa peça fundida [10]

Uma limitação mencionada por Sulaiman & Hamouda [8] é o mau acabamento superficial das peças vazada por fundição por areia, requerendo operações secundárias para acabamento, no entanto, o autor após visita a uma empresa de fundição, em Portugal, discorda com a afirmação, pois o acabamento superficial não é uma limitação.

## 2.3 MODOS DE FALHAS MAIS COMUNS EM ENGRENAGENS

### 2.3.1 Desgaste

Segundo Hohn & Michaelis [11], este fenómeno traduz-se, por definição, numa falha contínua sob filme de separação fino, que decorre geralmente a velocidades de passo lento e onde a interação das asperezas das superfícies pode acontecer (figura 2.9).

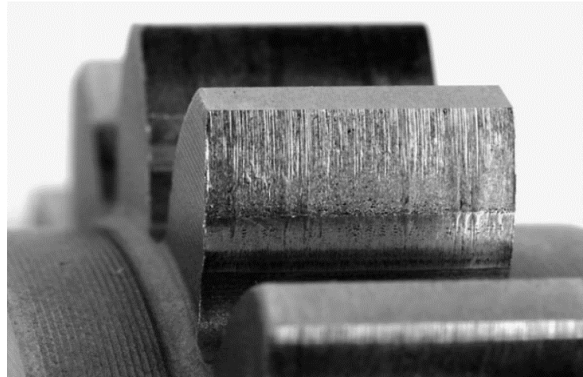


Figura 2.9 – Fenómeno de desgaste por abrasão nos dentes de uma engrenagem de dentes retos [11]

O autor Onishchenko [12] distingue o desgaste que ocorre em dentes de engrenagens em 2 tipos: (i) desgaste de baixa intensidade, ou desgaste normal, e (ii) desgaste de alta intensidade, onde ocorre o aparecimento do fenómeno de *scuffing*, que será abordado na secção 2.3.2. Segundo mesmo autor, desgaste normal é normalmente entendido pelo processo gradual da mudança de tamanho devido a fricção e é caracterizado pela remoção de partículas de material do dente por contacto das superfícies. Este escorregamento entre dentes leva um aumento gradual do dano provocado.

Muitos modelos de desgaste são baseados na Lei de Desgaste de Archard, demonstrada na equação (2) ([13], [14]):

$$\frac{V}{s} = K \frac{W}{H} \quad (2)$$

Onde  $V$  [m<sup>3</sup>] representa o volume do material que foi removido,  $W$  [N] a carga aplicada,  $H$  a dureza da superfície observada [Pa] e  $K$  o coeficiente de desgaste adimensional. A equação descreve a perda de volume por desgaste devido ao contacto entre duas superfícies planas.

Vários autores, como Flodin [1], Brandão et al [15] e Flodin & Andersson [16], apresentam simplificações da equação de Archard (2), aplicada para um ponto local em uma das superfícies de interação consideradas. A equação (3) apresentada pelos autores Flodin & Andersson [17] é um exemplo:

$$h = k \int_0^s p_c ds \quad (3)$$

Em que  $h$  é a profundidade de desgaste [m],  $p_c$  é a pressão de contacto [Pa],  $k$  é o coeficiente de desgaste e  $s$  é a distância de escorregamento [m]. Concluiu-se que  $s$  é o fator mais importante na determinação da taxa de desgaste.

Os mesmos autores Flodin & Andersson [17], mencionam ainda que o desgaste é influenciado pela (i) distância na direção radial em relação aos pontos de contacto de rolamento, (ii) pressão de contacto, (iii) dureza da superfície, (iv) lubrificação, (v) camada de lubrificante, (vi) temperatura, (vii) contaminação, entre outros.

Como num contacto de rolamento e deslizamento não é fácil de determinar a distância de escorregamento  $s$ , os mesmos autores propuseram o princípio de observação de um único ponto (*single point observation*), que consiste em observar e gravar a interação do movimento da superfície relativamente a um ponto na superfície, tornando assim mais fácil seguir o processo. Referem também que, para além de existirem opiniões de que o desgaste de baixa intensidade melhora as condições de contacto nas engrenagens, como se de pós de polimento dos flancos de engrenagens se tratasse, isto só se aplica a casos muitos gerais. O desgaste nos flancos dos dentes é não uniforme, devido à variação das condições de rolamento e deslizamento na interação entre os dentes da engrenagem.

Através de um modelo de desgaste desenvolvido pelos mesmos, foi concluído que a pressão é redistribuída pela superfície do dente devido ao desgaste e torna-se desigualmente distribuída, especialmente no círculo primitivo. É também referido que a distância percorrida é o fator mais importante para a determinação da taxa de desgaste.

O autor Suh [18] aponta alguns pontos fracos à teoria de Archard (equação (2)): (i) ignorar a física e a metalúrgica física da deformação do metal; (ii) muitas das premissas usadas na equação não serem razoáveis e serem arbitrárias e (iii) o facto de a teoria não fornecer numa informação sobre desgaste de metais em condições de escorregamento diferentes. O mesmo autor propôs a teoria da delaminação de desgaste, onde algumas das conclusões retiradas foram o facto de conseguir explicar muitos dos fenómenos experimentalmente observados, a taxa de desgaste decresce drasticamente quando a deformação de corte na superfície é precavida e a inclusão incontrolada de partículas duras acelera a taxa de desgaste de um material.

Nos testes realizados pelos autores Brandão et al [15], foi utilizado uma máquina de desgaste de testes entre dentes. O foco dos mesmos foi no desgaste excessivo, onde concluíram que a influência da camada de lubrificante utilizada não é clara, visto que, para uma camada de lubrificante fina, o desgaste apresentou um comportamento não linear.

No seu estudo, os autores Masjed & Khonsari [19] mostram que o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, aumentam com o aumento da rugosidade superficial, apesar do desgaste ser afetado mais significativamente que o coeficiente de atrito. É também mencionado o comportamento não linear da taxa de desgaste.

Segundo os autores Rodrigues & Martins [20] existem dois tipos de desgaste importantes:

- O desgaste por adesão origina a uma superfície de fratura (geralmente sendo a superfície mais macia) e a um fragmento que fica embutido na outra superfície. Os fragmentos arrancados podem dar origem a partículas duras que interferem e movimentam de uma forma livre na interface de contacto entre as superfícies, o que provoca desgaste nas mesmas.
- E o desgaste por abrasão que tem origem na ação de partículas duras que se interpõe entre duas superfícies, o que provoca uma perda progressiva de material das superfícies, deixando marcas de desgaste alinhadas com a direção do movimento relativo entre as superfícies.

### 2.3.2 *Scuffing*

O fenómeno de *scuffing* (figura 2.10), é definido como um dano instantâneo, causado pela ocorrência de um fenómeno de solda, na fase sólida, entre as superfícies dos dentes das engrenagens que estão em contacto [11].

Quando este fenómeno ocorre, a película de lubrificante entre os dentes é danificada, ocorrendo uma interação molecular entre as superfícies de trabalho, ou seja, o contacto entre os dentes ocorre através de películas de óxido. Nas zonas que foram friccionadas, são formadas novas estruturas, com a martensite, numa zona referida como “zona branca”, que é de alta dureza, tal como se pode verificar na figura 2.10 [12].



Figura 2.10 – Fenómeno de scuffing numa engrenagem de dentes retos [11]

Os autores Hohn & Michaelis [11] referem que a proteção das superfícies podem ser feitas através de lubrificação hidrodinâmica<sup>1</sup>, com recurso a óleos, ou através de proteção física com recurso a adesivos ou químicos. Todas as camadas protetoras estão fortemente dependentes do aumento da temperatura de serviço a que estão sujeitas: camada hidrodinâmica do lubrificante e a sua viscosidade

---

<sup>1</sup>O mecanismo de lubrificação hidrodinâmica para existir requer a presença de fluídos viscosos e caracteriza-se pela formação de uma película suficientemente espessa, com uma ordem de grandeza superior à rugosidade das superfícies, para que o contacto direto entre as duas superfícies seja totalmente eliminado.[20]

diminuem; os adesivos perdem força com o aumento da temperatura e a atividade dos químicos aumenta, influenciando as reações cinéticas.

O teste mais comum para a determinação da ocorrência do fenómeno de *scuffing* consiste em fazer escorregar uma superfície em relação a outra, que se encontra estacionária, a uma velocidade de escorregamento fixa, e o carregamento que é determinado quando o fenómeno de *scuffing* ocorre [21]. Os mesmos autores Ingram, Hamer e Spikes [21] desenvolveram um novo método de teste para o fenómeno de *scuffing* que fazer rolar e deslizar duas superfícies metálicas, mas em sentidos opostos. Este método possibilita desacoplar a velocidade de escorregamento da velocidade de arrastamento para que as propriedades de *scuffing* de um lubrificante possam ser determinadas numa lubrificação de fronteira através de várias velocidades diferentes.

O autor Onishchenko [12] concluiu que *scuffing* é um processo que cresce exponencialmente. Afirma ainda que este fenómeno é também dependente do desgaste excessivo causado pela deterioração das condições de contacto, o que implica a ocorrência de distorções no perfil do dente, provocando distorções na forma do dente.

### 2.3.3 Micro picagem

Segundo Brandão et al. [14], micro picagem é um tipo de dano por fadiga, associada a condições de não conformidade de rolamento/deslizamento em elementos mecânicos.

É um modo de falha devido a fadiga da superfície, onde predominantemente nas áreas de deslizamento negativo (altura de pé – ver figura 2.5), originando quebra do material da superfície [11].

Numa engrenagem, a micro picagem é revelada por manchas cinzentas grandes na superfície dos flancos do dente (figura 2.11). Quando observadas num microscópio, estas manchas cinzentas são constituídas por grandes quantidades de picos microscópicos, denominados de micro picos. As suas dimensões não ultrapassam cerca de 20  $\mu\text{m}$  em profundidade e largura ao longo da altura do dente.



Figura 2.11 - Fenómeno de micro picagem numa engrenagem de dentes retos [11]

Devido às condições particulares de contacto da engrenagem, o comprimento de um micro pico ao longo da direção axial é geralmente muito maior, muitas vezes cobrindo 100  $\mu\text{m}$  [14].

Este fenómeno está associado à iniciação e crescimento de microfissuras contra a direção de escorregamento, que faz um ângulo entre 15 ° a 30 ° com o flanco da engrenagem. É referido ainda que este fenómeno provoca alterações na microestrutura do perfil da engrenagem, modificando desta forma a distribuição de tensões de contacto na superfície lateral da engrenagem, introduzindo regiões com altas concentrações de tensões. É provocado, deste modo, uma rotação da engrenagem menos eficiente, aumentando assim a possibilidade da ocorrência de falha na peça [22].

Os autores Al-Tubi et al. [6] efetuaram testes em engrenagens que consistiam na análise da iniciação e propagação da micro picagem, que consistiram na quantificação do desenvolvimento de micro picos e a sua taxa de progressão após um determinado número de ciclos de operação. Os testes mostraram que a micro picagem tem início na zona de altura de pé do dente (figura 2.5), mas propaga-se para a zona superior. Os resultados analíticos obtidos, baseados na medição da variação da rugosidade da superfície das engrenagens testadas, confirmam que a tensão de contacto máxima e a espessura mínima de lubrificante ocorrem nestas regiões. A variação da espessura da camada de lubrificante, deve-se às mudanças de rugosidade da superfície, depois das engrenagens serem sujeitas a vários ciclos de carga.

Deste modo, os fatores principais causam este fenómeno, segundo os referidos autores, são (i) o carregamento excessivo, (ii) a micro geometria do perfil, (iii) a rugosidade da superfície e (iv) a espessura da camada de lubrificante.

#### 2.3.4 Picagem

Muitas vezes também referido como macro picagem, picagem é uma falha de fadiga, na zona da altura de pé (figura 2.12), que é originada devido a fendas na superfície que se propagam para o material, progredindo ainda mais sob elevados níveis de tensão de corte sob superficiais [11].

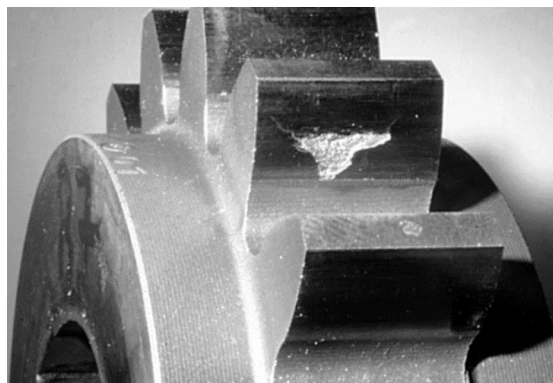


Figura 2.12 - Fenómeno de picagem numa engrenagem de dentes retos [11]

É altamente influenciada pela tensão de Hertzian<sup>2</sup>, pela tensão de corte na superfície, e pela formação de filme de lubrificante. Lubrificantes com viscosidade de operação mais alta fornecem maiores limites de endurecimento [11].

Este fenómeno ocorre nos flancos dos dentes das engrenagens e é reportada como sendo a maior causa de falhas em transmissões. As fissuras são originadas na superfície e propagam-se, a uma pequena profundidade, causando um desprendimento de detritos de material, dos quais resultam a formação de crateras. O fenómeno de picagem leva a ocorrência de vibração, barulho, perda de eficiência e eventualmente levando a inutilidade da engrenagem [2].

A picagem depende ainda da rugosidade da superfície de contacto, da microestrutura do material e das condições de operação a que a engrenagem está sujeita, como por exemplo, o tipo de contacto entre os materiais, o tipo de carregamento, a temperatura de serviço, entre outros. [23].

A iniciação das fendas representa o período mais importante no fenómeno de picagem. A posição e o modo como esta se propaga depende da microestrutura do material, do tipo de tensão aplicada e da micro e macroestrutura da amostra. As fendas, por norma, iniciam a sua propagação nas zonas onde as tensões são maiores. Dependendo nas diferentes combinações de rolamento e deslizamento, estas podem-se iniciar sobre ou sob a superfície [23].

A diferença da (macro) picagem para a micro picagem deve-se a que o fenómeno de picagem tende a ocorrer em situações onde os carregamentos são mais extremos, criando assim picos maiores que na micro picagem. Por este motivo, existem autores, como por exemplo Höhn & Michaelis [11], que fazem a distinção entre os dois fenómenos.

O mesmo acontece na norma ISO 10825:1995 (*Gears. Wear and damage to gear teeth. Terminology*) [24], referindo que a camada de lubrificante é demasiado fina para a carga a que a engrenagem está sujeita, o que leva ao aparecimento dos referidos micro picos.

---

<sup>2</sup> Tensão de estado de *Hertzian*. a máxima pressão é feita no centro do contacto, assumindo 2 princípios: a) a área de contacto entre as superfícies dos dentes é circular, elítica ou uma linha e b) a distribuição de pressões assume um perfil parabólico [35].



## 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.1 ENQUADRAMENTO

Quando considerado o uso de materiais num componente deslizante, é indicado que sejam submetidos a testes de tribologia, de modo a determinar o seu comportamento ao desgaste, simulando as condições a que estes irão estar sujeitos, na vida real. É sabido que tanto o calor gerado devido à fricção, como o aumento da temperatura de contacto, têm uma influência importante no comportamento tribológico e de falha de componentes deslizantes [25].

O desgaste de muitos materiais, como por exemplo polímeros, metais e cerâmicos, é afetado significativamente pelas temperaturas de contacto durante o escorregamento [26].

### 3.2 CONJUNTO DE ENGRENAGENS A ANALISAR

O par de engrenagens a analisar, no âmbito desta tese, é composto por uma roda dentada helicoidal que é feita rodar sobre um veio pinhão, também este com dentes helicoidais (figura 3.1).

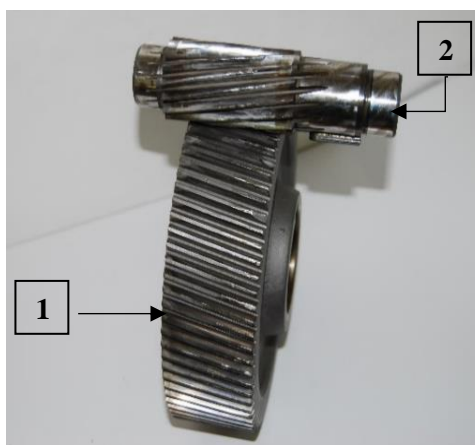


Figura 3.1 - Par de engrenagens em estudo: (1) Roda dentada; (2) veio pinhão

O material de fabrico de ambos os componentes deste conjunto é aço DIN 16MnCr5, cuja composição química encontra-se na tabela 3.1, tal como está mencionada na norma DIN EN 10084:2008: *Case hardening steels - Technical delivery conditions* [27].

Tabela 3.1 - Composição química do aço DIN 16MnCr5 [27]

Elemento	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>
% /massa	0.14 – 0.19	0.40	1.00 – 1.30	0.025	≤0.035	0.80 – 1.10

É apresentada na figura 3.2 a microestrutura do aço DIN 16MnCr5 que compõe a engrenagem em estudo. Esta imagem foi obtida, após contraste da amostra com Nital, com recurso ao microscópio Olympus CX40 e à câmara digital instalada no microscópio Olympus DP2, disponíveis no Laboratório de Caracterização de Materiais (CM) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

A microestrutura apresentada é uma estrutura bainítica, sendo um dos produtos que se pode formar quando a austenite é arrefecida depois de passar a sua temperatura crítica, podendo ser considerado uma transformação de martensite incompleta.

As zonas mais escuras podem ser identificadas como agregados de ferrite e separados por zonas mais clara de martensite num estágio iniciante [28].

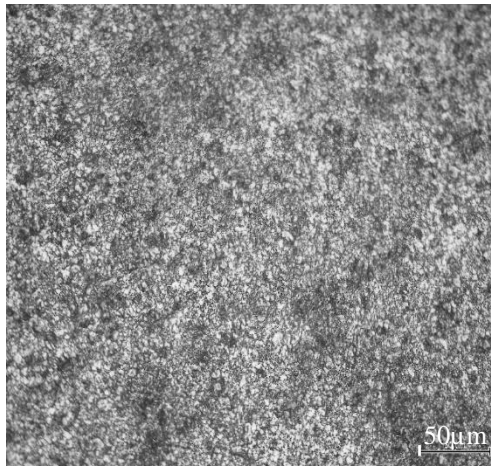


Figura 3.2 - Microestrutura do aço DIN 16MnCr5

O tempo real de funcionamento estimado para a engrenagem é de 16000 horas e os tratamentos térmicos a que o conjunto foi sujeito foram os seguintes:

- O material de base foi submetido ao processo de têmpera.
- Depois da produção, e do processo de têmpera, o conjunto foi submetido a cementação e retificação final do dentado.

Os danos detetados na engrenagem fornecida pela SEW Eurodrive, estão relacionados com falhas prematuras do cárter (que fraturou) ou dos rolamentos do veio de saída (que se destruíram) devido a esforços demasiado elevados que são transmitidos ao redutor.

As fraturas dos dentes da engrenagem supõem-se, segundo o fabricante, devidas ao desalinhamento, isto é, devido à fratura do cárter, as engrenagens deixaram de trabalhar na sua posição de serviço (alinhadas) e passaram a trabalhar desalinhadas, levando à fratura do dentado.

Em relação ao equipamento, a potência do motor que aciona este redutor é de 5,5 kW a 1500 rpm, a relação de transmissão do redutor é de 27,88 e o binário no veio de saída deste redutor é de 800 N.m a 50 rpm.

### 3.3 ENSAIOS DE MICRO DUREZA VICKERS

De acordo com norma ASTM E384 – 16: *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials* [29], os ensaios de dureza são muito úteis na avaliação de materiais, controlo de qualidade de produção e investigação e desenvolvimento. É um ensaio que pode ser relacionado com a tensão de rotura para muitos metais e ligas, sendo ainda um indicador de maquinabilidade, resistência ao desgaste, durabilidade e ductilidade.

Os testes de micro indentação são utilizados para avaliar e quantificar variações de dureza que ocorrem em distâncias pequenas.

A micro dureza Vickers não é alterada pela escolha da carga de teste (varia entre 25 gf até 1000 gf) porque a geometria da indentação é constante e depende da profundidade da indentação.

Na figura 3.3 está representada a geometria de um indentador Vickers, em que a sua face superior apresenta a forma de uma pirâmide quadrangular, feita de diamante, com ângulos de face de  $136^\circ$ .

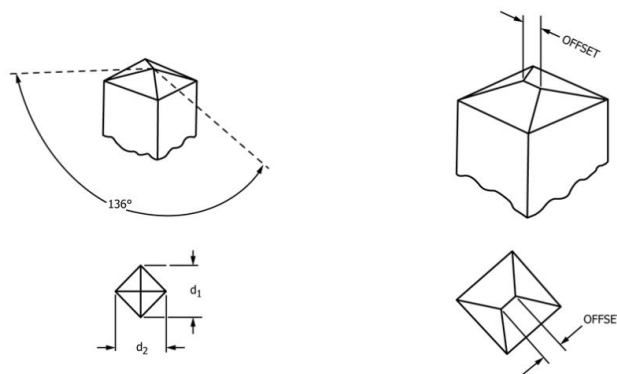


Figura 3.3 - Representação da geometria de um indentador Vickers (Adaptado) [29]

Onde  $d_1$  e  $d_2$  representam o comprimento média de cada diagonal do indentador.

#### 3.3.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental utilizado no ensaio de micro dureza Vickers, realizado no âmago desta tese, é baseado na norma ASTM E384 – 16: *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials* [29].

Em relação ao espaçamento entre indentações, é referido a necessidade em garantir um espaçamento mínimo de 2,5 vezes a maior diagonal de Vickers ( $dV$ ) (figura 3.4 a)).

Os ensaios de micro dureza Vickers, realizados tiveram a duração de 10 segundos, o espaçamento entre cada indentação considerado foi de 0,3 mm e a carga de teste escolhida foi de 500 gf (cerca de 4,905 N). Estes testes foram efetuados com o micro durómetro Mitutoyo HM-112, disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL (figura 3.4 b)).

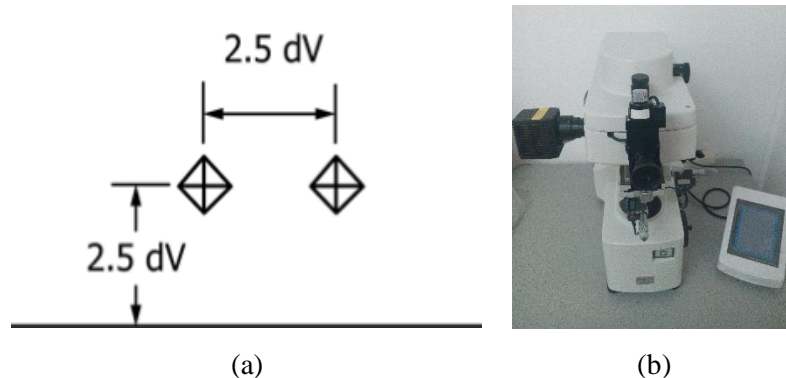


Figura 3.4 - (a) Espaçamento mínimo recomendado para indentações de Vickers (adaptado) [29]; (b) Mitutoyo HM 112

A preparação de amostras, para examinação metalográfica, seguiu a norma ASTM E3 – 95: *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens* [30], e foi realizada no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL.

Tendo em conta o caso em estudo, a preparação das amostras para examinação metalográfica é descrita nos três seguintes pontos (1 – Corte de amostras; 2 - Montagem das amostras e 3 – Polimento das amostras):

### 1. Corte de amostras

Para obtenção de amostras a partir da roda dentada helicoidal (figura 3.5), foram efetuados os cortes necessários, com recurso a corte por jato de água, disponibilizado pela empresa 4x4 Multi Trabalhos, Lda., em Setúbal.



Figura 3.5 - Roda dentada de dentes helicoidais

O desenho técnico utilizado para a execução dos cortes efetuados na roda dentada, acima descritos, é apresentado na figura 3.6. Este desenho foi feito pelo autor em SolidWorks2016 e gravado em ficheiro dxf, para ser lido pela máquina de corte a jato de água. As amostras foram cortadas em cilindros de diâmetro 25 mm (corpo da engrenagem). Foram cortadas também duas secções dos dentes.

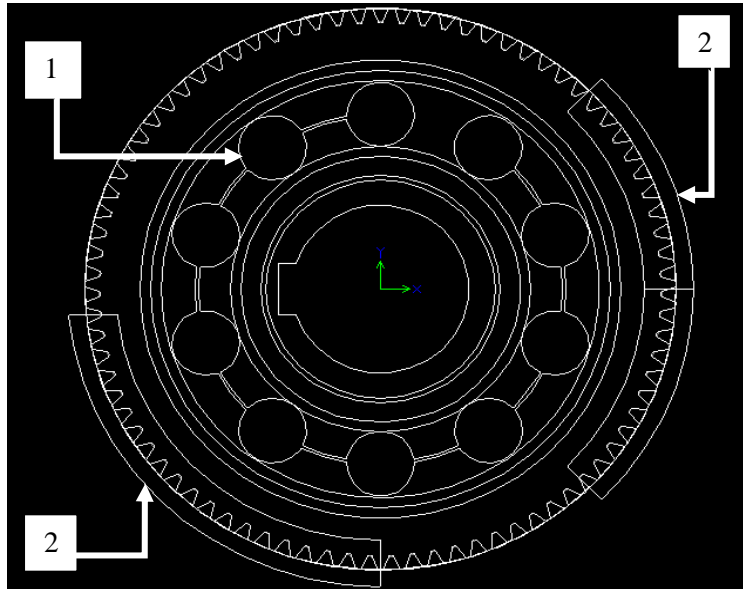


Figura 3.6 - Desenhos e localização dos cortes feitos na roda dentada, com recurso a jato de água, em ficheiro .dxf: (1) Corte de amostras cilíndricas de diâmetro 25mm; (2) Corte de duas secções dentes

Foram “retirados” dez cilindros da parte interior da roda dentada (ver figura 3.7 e figura 3.8). Dois destes cilindros foram depois seleccionados para o corte de várias amostras para o estudo da dureza e do desgaste; outro foi escolhido para o estudo e caracterização de defeitos do material em questão e os restantes para a elaboração de pinos e amostras, para efetuar os ensaios de desgaste.



Figura 3.7 - Cortes efetuados na roda dentada helicoidal



Figura 3.8 - Amostras retiradas da parte interior da roda dentada

Na figura 3.9 é apresentado duas peças cortadas da roda dentada que serviram para obtenção das amostras para ensaios de dureza dos dentes da roda dentada.



Figura 3.9 - Amostras retiradas de dentes para análise

A partir da “coroa de cilindros”, que foi apresentada na figura 3.8, foram separados os cilindros B e C para a realização de ensaios de micro dureza e o cilindro A para análise de defeitos no material que compõe o corpo da roda dentada (figura 3.10 a)).

Os cilindros A, B e C foram seccionados em 4 partes aproximadamente iguais, com recurso a corte por serra automática GBS-218 Eco AutoCut (figura 3.10 b)), disponível no Laboratório de Processamento Térmico de Materiais (PTM) do DEMI da FCT-UNL.

Na figura 3.11 é apresentada numa sequência de imagens a forma como foi obtida a amostra C3 para estudo e a zona onde este incidiu. O equivalente foi feito no cilindro B onde foram avaliadas as amostras B2 e B3 e no cilindro A onde foram analisadas as amostras A1 a A4.



Figura 3.10 - a) Cilindros separados para obter amostras; b) serra automática GBS-218 Eco AutoCut

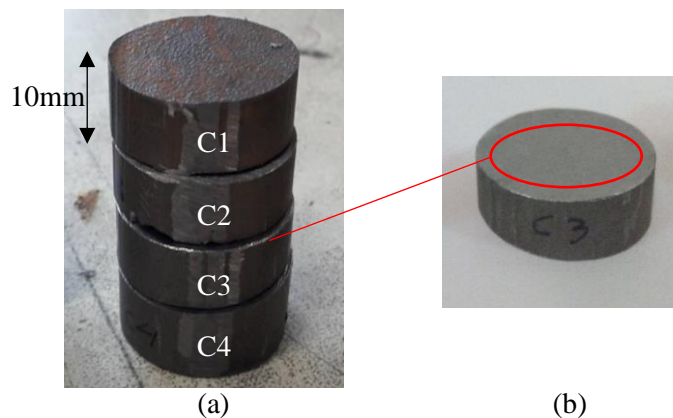


Figura 3.11 – (a) Exemplo da obtenção da amostra C3; (b) superfície analisada da amostra C3

Na figura 3.12 é apresentado um exemplo de como foram obtidas amostras dos dentes A, B e C para os ensaios de micro dureza, com recurso a corte por rebarbadora, disponível no Laboratório de PTM do DEMI da FCT-UNL.

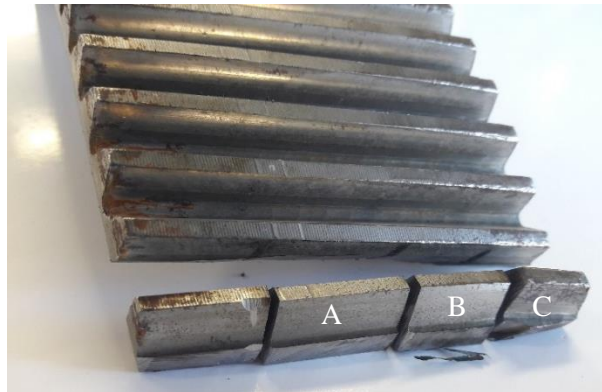


Figura 3.12 - Exemplo de corte de dentes para ensaios de dureza

## 2. Montagem de amostras

A montagem de amostras foi feita no Laboratório de PTM do DEMI da FCT-UNL, recorrendo a resinas epóxi (uma medida de resina EpoxiCure para uma medida de endurecedor de resina EpoxiCure 2). Estas apresentam as melhores propriedades no que toca a transparência, geração de calor, encolhimento e adesão da amostra.

As amostras foram colocadas dentro de recipientes de plástico, tendo sido depois introduzida a mistura de resina com o endurecedor, onde ficaram a repousar até esta solidificar (figura 3.13).

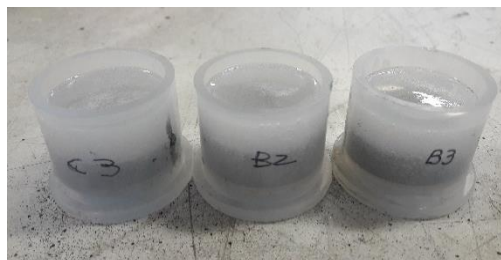


Figura 3.13 - Exemplo de amostras colocadas em molde com resina epóxi para polimento

## 3. Polimento de amostras

Esta etapa baseou-se em dois passos fundamentais:

- A amostra foi polida em papeis abrasivos sucessivamente mais finos, ou seja, a sequência do grão dos papeis abrasivos a utilizada foi de 80, 240, 320, 400, 600, 1200 e 2500, que são postos a girar na polideira Buehler Phoenix Alpha, (ver figura 3.14) disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL. Foi utilizada água para lavar os detritos de moagem e atuar como lubrificante.
- O polimento final foi feito com pasta de diamante de 1 $\mu$ m da Buehler MetaDi II, embutido num pano específico para fins metalográficos, disponíveis no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL.



Figura 3.14 - Máquina de polimento Buehler Phoenix Alpha

### 3.3.2 Tratamento de dados

Os resultados obtidos nos ensaios de micro dureza Vickers devem ser apresentados de acordo com a norma ASTM E384 – 16: *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials* [29], referindo o número de indentações feitas, a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95%.

De modo a verificar se os valores medidos de dureza, em cada amostra, seguem uma distribuição normal, recorreu-se ao *software* Minitab para a realização de gráficos de probabilidade correspondente a cada conjunto de dados recolhidos. O *software* referido usa o teste de Anderson-Darling, em que o valor de probabilidade (*p-value*) calculado tem que ser superior ou igual ao valor de confiança  $\alpha$  de 0,05.

As figuras 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam a verificação da normalidade dos valores obtidos para as amostras B2, B3 e C3, respetivamente, nos ensaios de micro dureza no corpo da engrenagem.

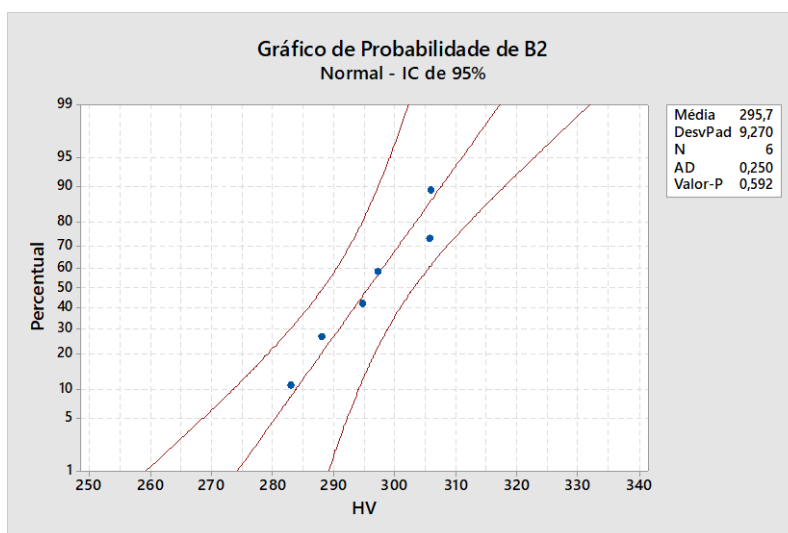


Figura 3.15 - Gráfico de probabilidade para a amostra B2

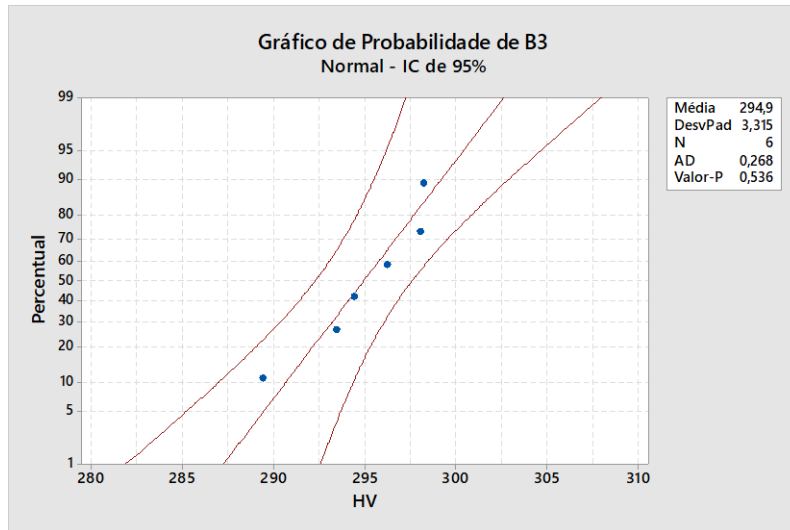


Figura 3.16 - Gráfico de probabilidade para a amostra B3

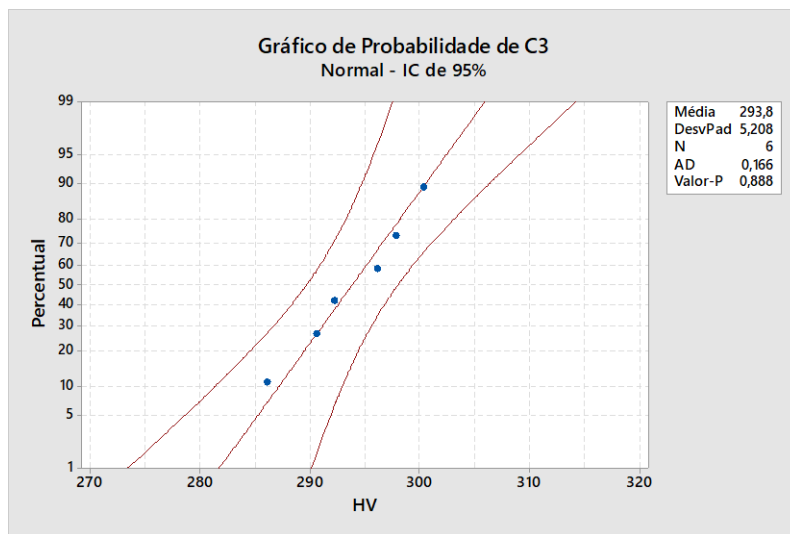


Figura 3.17 - Gráfico de probabilidade da amostra C3

Nas figuras 3.18 a 3.20 são apresentados os respectivos gráficos de probabilidades relativo às indentações realizadas nos dentes A, B e C, onde foi analisado a zona da secção do flanco da cabeça.

Os resultados obtidos são reportados e analisados no capítulo 4 deste documento.

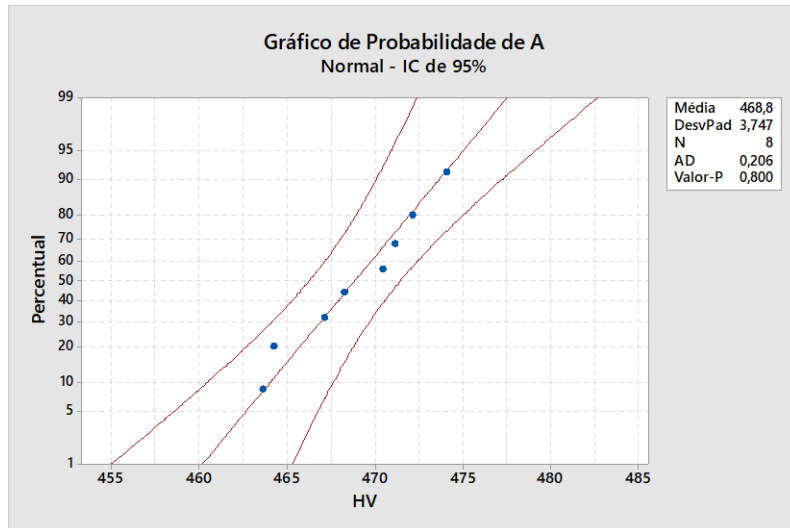


Figura 3.18 - Gráfico de probabilidade do dente A

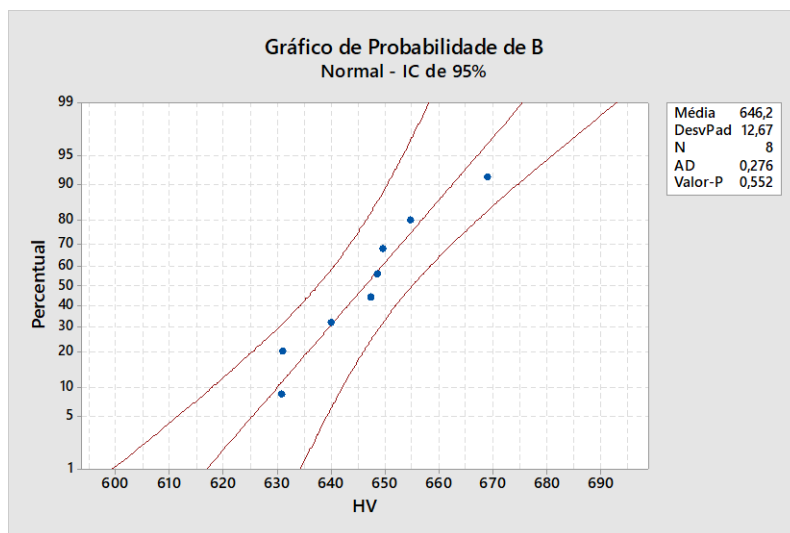


Figura 3.19 - Gráfico de probabilidade do dente B

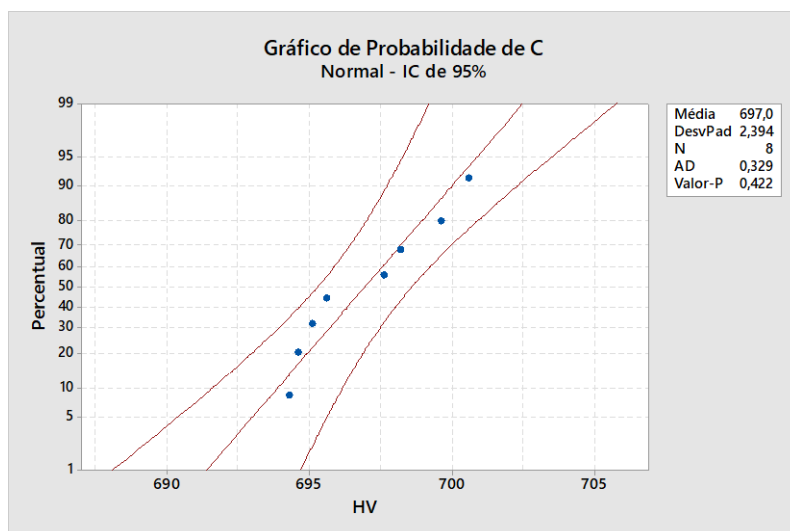


Figura 3.20 - Gráfico de probabilidade do dente C

### 3.4 ANÁLISE DE DEFEITOS

Para proceder à análise de defeitos no material em questão, dividiu-se um dos cilindros, em quatro partes iguais (A1, A2, A3 e A4), tal como é demonstrado na figura 3.21. A preparação da superfície das amostras foi realizada de acordo com o procedimento experimental descrito na norma ASTM E3 – 95: *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens* [30], que é exatamente igual ao que foi realizado na preparação de amostras para os ensaios de micro dureza Vickers, descrito no ponto 3.3.1.



Figura 3.21 - Corte das amostras A1 a A4 para análise de defeitos

A análise de defeitos foi realizada com recurso ao microscópio ótico invertido Leica DMI 5000M, disponível no Laboratório de Microscopia Ótica do Centro de Investigação em Materiais (CENIMAT) da FCT/UNL e que permitiu a aquisição de várias imagens ao longo da extensão de cada amostra, com recurso à tecnologia de *multistep* (figura 3.22). A contagem dos defeitos foi feita recorrendo ao *software* de tratamento de imagem ImageJ.

No capítulo 4 serão apresentados e discutidos os resultados relativos a análise de defeitos efetuada.

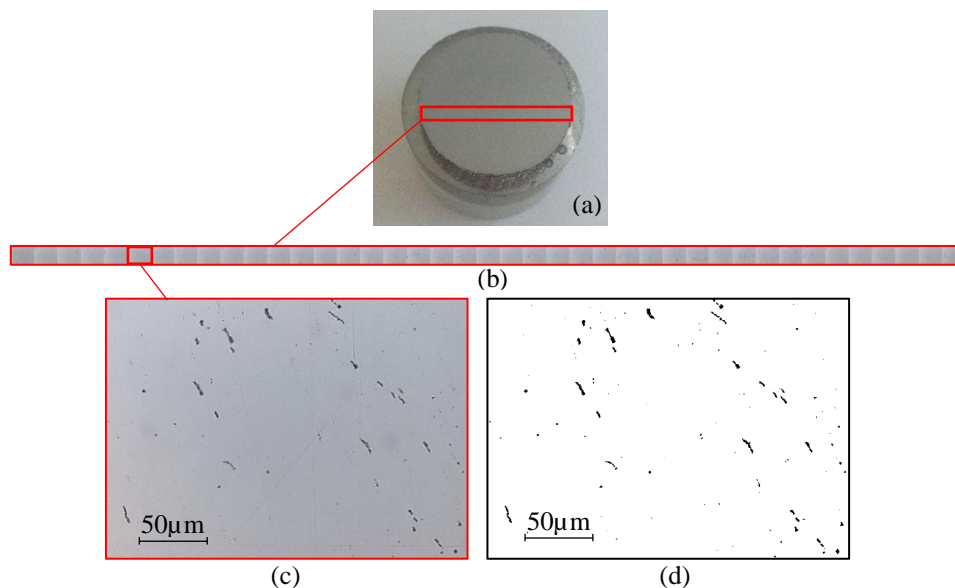


Figura 3.22 - (a) amostra A1; (b) fotografia através da tecnologia multistep de zona em análise; (c) exemplo de fotografia para análise de defeitos; (d) imagem contrastada pelo software ImageJ para análise de defeitos

### 3.5 ENSAIOS DE DESGASTE

Os ensaios de desgaste foram efetuados numa máquina de testes *pin-on-disc*, existente no Laboratório de Processamento Mecânico de Materiais (PMM) do DEMI da FCT-UNL. O procedimento para a realização deste ensaio está descrito detalhadamente na norma ASTM G99 – 95a: *Standard test method for wear testing with pin-on-disc apparatus* [31].

O teste *pin-on-disc* é de uso frequente [26] e serve para a avaliação do desempenho tribológico de contacto entre peças metal-metal, a uma escala laboratorial. As características principais destes sistemas tribológicos avaliadas na realização deste teste são o atrito e o desgaste [32].

O princípio de funcionamento do teste *pin-on-disc* consiste em fazer rodar uma amostra sob um pino fixo, a uma velocidade angular  $\omega$  durante um determinado período de tempo  $t$ , com uma carga  $F_N$  aplicada, de modo a que seja provocada uma pista de desgaste na amostra de raio interior  $R$  (figura 3.23).

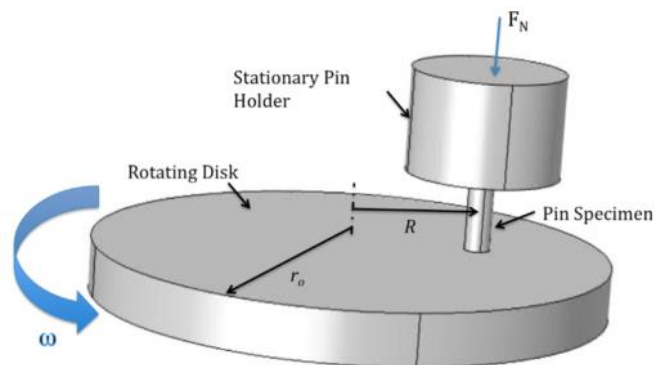


Figura 3.23 - Ilustração de dispositivo de pin-on-disc [26]

Os autores Bortoleto et al. [32] fizeram uma análise por simulação em elementos finitos (EF) para um teste de *pin-on-disc*. Foi concluído que (i) é possível explicar e reproduzir através de EF os fenómenos observados durante o teste de *pin-on-disc*, mostrando que a perda de massa é maior à medida que a carga imposta no pino é maior; (ii) o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da carga normal imposta e (iii) identificar um regime de transição de desgaste, que ocorre entre as cargas de 10 N e 70 N, ou seja, adesão e deformação plástica caracteriza o desgaste severo a partir de 70 N e o desgaste leve é evidenciado a partir de 10 N.

De acordo com a norma ASTM G99-95 [31], os parâmetros do teste de desgaste *pin-on-disc* são os seguintes:

- Carregamento aplicado na zona de contacto;
- Velocidade relativa de escorregamento entre as superfícies em contacto;
- Distância de escorregamento;
- Temperatura da amostra em localizações próximas da zona de contacto;
- Atmosfera onde o teste é realizado.

### 3.5.1 Procedimento experimental

Estes ensaios foram divididos em duas partes: ensaios a seco e ensaios com lubrificante usado fornecido pela SEW Eurodrive Portugal.

Para os ensaios de desgaste foram utilizados os topos cementados dos cilindros, referidos na secção 3.3.1. Os pinos usados nestes ensaios foram torneados no Laboratório de PMM do DEMI da FCT-UNL, com recurso ao Torno Optimum D 460 x 1500, a partir de cilindros (figura 3.24). e possuem 5 mm de diâmetro (figura 3.25), tal como recomenda a norma ASTM G99-95a [31]. Estes também possuem a ponta com cementação, de modo a se simular o contacto entre os dentes de uma engrenagem.



Figura 3.24 - (a) Um dos cilindros retirados da engrenagem para amostras; (b) amostras para desgaste e um dos pinos utilizados

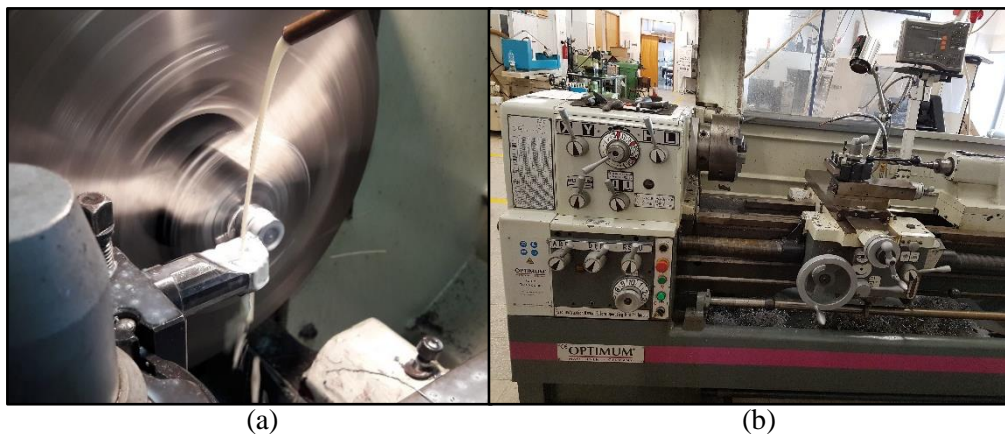


Figura 3.25 - (a) Torneamento de amostras cilíndricas para obtenção de pinos; (b) Torno Optimum D 460 x 1500

#### ➤ Ensaios a seco

O objetivo da realização deste primeiro ensaio a seco foi simular o material no pior estado de utilização. Foram traçados dois perfis de taxa de desgaste:

- O primeiro teste (Ensaio-1) representa a taxa de desgaste com carga máxima aplicada de 41,14 N e com a duração de 50 minutos. Foram feitas paragens a cada 10 minutos para pesagem da amostra e do pino. O objetivo da realização deste ensaio foi avaliar a taxa de desgaste, ao longo do tempo, com a carga máxima aplicável.

- O segundo teste de desgaste a seco (Ensaio-2) incide na perda de volume da amostra e do pino em relação à variação das cargas 16,93 N, 30,84 N, 34,35 N e 41,14 N impostas na amostra. O ensaio teve a duração de 40 minutos.

➤ Ensaio com lubrificante usado

No que toca aos ensaios com lubrificante usado, foram analisadas as amostras B1, B4 e H4 utilizadas com área de secção circular de 25mm de diâmetro, que não tinham sido utilizadas nos ensaios de micro dureza Vickers (figura 3.11), abordadas na secção 3.3. Nestes ensaios aplicou-se carga de 82,75 N com duração de 40 minutos e foram feitos em atmosfera controlada, com recurso a gás inerte, neste caso argon, a debitar 5l/min (figura 3.26), que foi aberto 2 minutos antes do começo de cada ensaio.

Neste ensaio foi decidido aumentar a carga cerca de o dobro, visto que os testes realizados com 41,14 N não apresentavam desgaste significativo, tanto visualmente, como nas medições efetuadas.



Figura 3.26 - Caudalímetro da botija de gás a debitar argon a 5 l/min durante a realização de um ensaio

Visto que um dos parâmetros do ensaio *pin-on-disc* é o controlo da temperatura próximas da zona de contacto do pino com a amostra, a solução encontrada para a sua verificação contínua foi efetuar um furo de 1,6 mm a 5 mm na ponta do pino, com recurso a engenho de furar Pirra Estremoz (disponível no Laboratório de PTM do DEMI da FCT-UNL) (figura 3.27); e colocar-se um termopar RS Pro tipo K nesse furo, juntamente com massa térmica de óxido metálico da RS Pro, com condutividade térmica de 0,65 W/Mk, ligados com fita isolante Kapton da Tesa (figura 3.28), disponíveis no Laboratório de Laboratório de Ensaio Não Destrutivos (END) do DEMI da FCT-UNL.

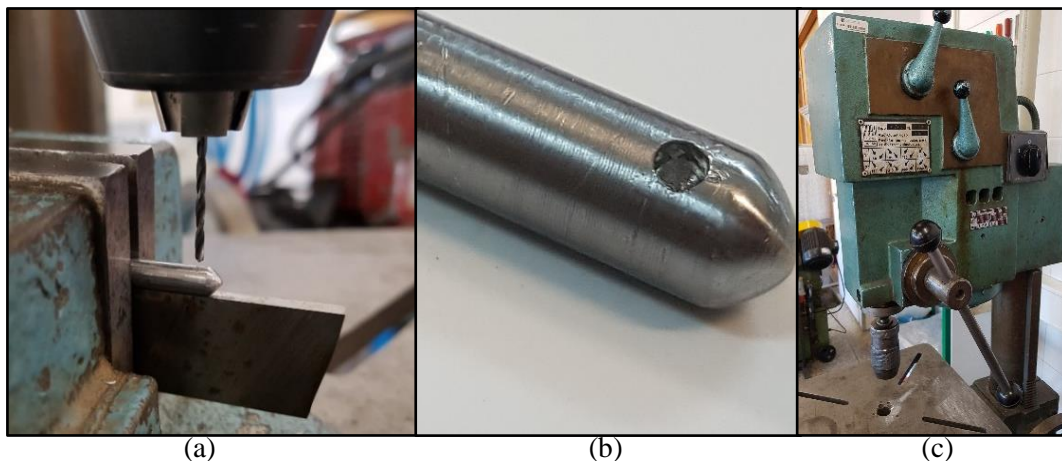


Figura 3.27 – (a) furação da ponta do pino para inserção do termopar tipo K; (b) pormenor do furo realizado; (c) engenho de furar Pirra Estremoz utilizado

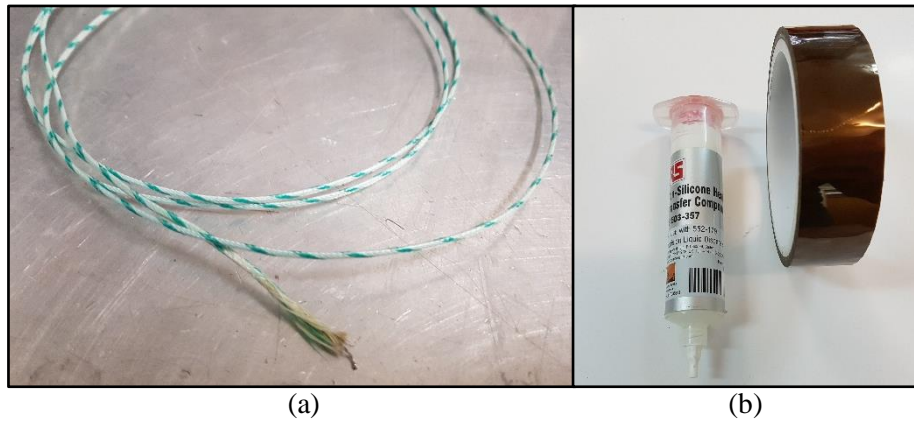


Figura 3.28 - (a) termopar tipo K; (b) massa térmica de óxido metálico e fita isolante Kapton

Em relação à preparação da superfície das amostras, é aconselhado pela norma ASTM G99-95a que a rugosidade superficial média ( $Ra$ ) das amostras seja inferior ou igual a  $0.8 \mu\text{m}$  [31]. Para que esta recomendação da norma fosse cumprida, as superfícies das amostras estudadas foram retificadas antes de cada ensaio, com recurso à retificadora Sunlike SSG-2550AH, disponível no Laboratório de PMM do DEMI da FCT-UNL (ver figura 3.29). A medição da  $Ra$  foi efetuada em 3 direções diferentes (D1, D2 e D3) (ver figura 3.30 b)) para todas as amostras com recurso ao rugosímetro Marh MarSurf PS10, disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL. Nas tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 são apresentadas as medidas de  $Ra$  obtidas nas amostras para os ensaios a seco e com lubrificante usado.

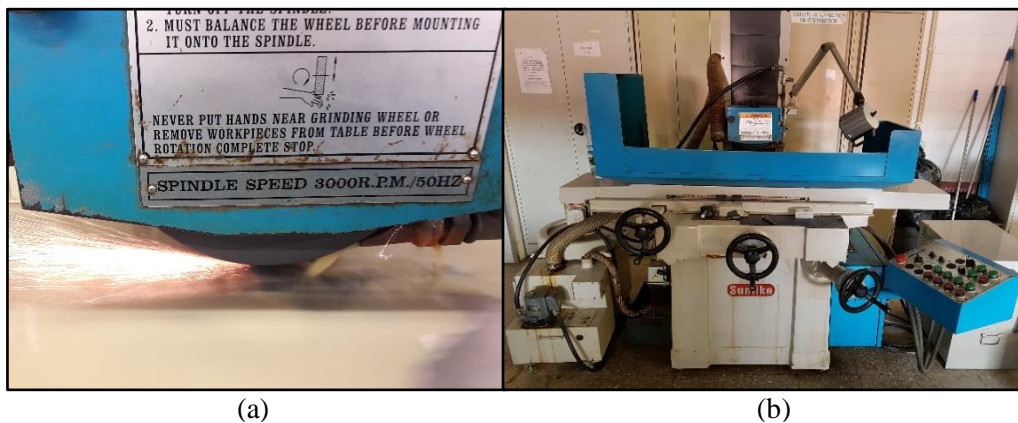


Figura 3.29 - (a) exemplo de retificação da amostra C1; (b) retificadora Sunlike SSG-2550AH

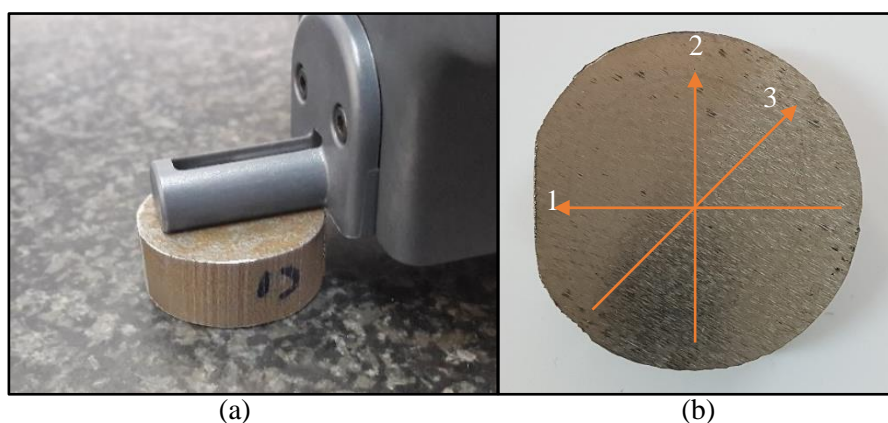


Figura 3.30 - (a) medição da rugosidade média com rugosímetro; (b) identificação das 3 direções na amostra

Tabela 3.2 - Rugosidade média da amostra E4 antes e depois de retificação para a realização do primeiro ensaio

Amostra	Rugosidade Média [ $\mu\text{m}$ ]					
	Antes de retificar			Após de retificar		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
<b>E4</b>	6,007	6,082	4,844	0,185	0,117	0,306

Tabela 3.3 - Rugosidade média da amostra E4 e E1 antes da realização do segundo ensaio

Carga aplicada [N]	Amostra	Rugosidade Média [ $\mu\text{m}$ ]		
		D1	D2	D3
<b>10,83</b>	E4	0,084	0,110	0,093
<b>30,84</b>	E4	0,441	0,426	0,427
<b>34,35</b>	E1	0,061	0,061	0,062
<b>41,14</b>	E4	0,284	0,293	0,275

Tabela 3.4 - Rugosidade média das amostras B4, B1 e H4 antes e depois da retificação para a realização de ensaios com lubrificante usado

Amostra	Rugosidade Média [ $\mu\text{m}$ ]					
	Antes retificação			Após retificação		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
<b>B4</b>	5,509	6,406	7,152	0,139	0,149	0,156
<b>B1</b>	6,401	6,042	5,906	0,059	0,065	0,071
<b>H4</b>	4,835	5,548	5,045	0,115	0,140	0,144

Para a execução dos ensaios *pin-on-disc* foi necessário encontrar uma solução para apoiar as amostras, de modo a adaptar a sua geometria à geometria do apoio da máquina (figura 3.31 a)). A solução encontrada passou por fazer um suporte (ver figura 3.31 b)) de poliácido lático (PLA) através de manufatura aditiva, com recurso à máquina de impressão 3D Ultimaker 3 Extended (figura 3.31 c)), disponível no Laboratório de END do DEMI da FCT-UNL. Foi necessário também fazer um entalhe nas amostras (figura 3.30 b)), de forma a que esta se mantenha no suporte quando o ensaio está a decorrer.

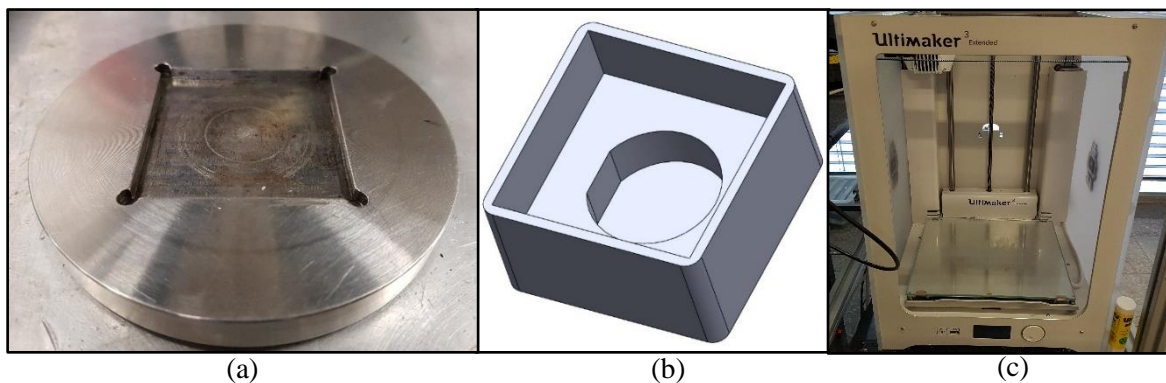


Figura 3.31 - (a) suporte para amostra na máquina pin-on-disc; (b) modelação 3D de suporte com entalhe para amostra; (c) impressora 3D Ultimaker Extended

O procedimento experimental seguido para a realização dos ensaios de desgaste, baseou-se na norma ASTM G99-95a [31], e assentou nos 7 passos descritos:

1. Limpar e secar adequadamente as amostras.
2. Pesar as amostras antes e depois da realização do respetivo ensaio. As amostras foram pesadas na balança da AND GR-200, disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL (figura 3.32).
3. O pino foi inserido no orifício respetivo, ajustando de modo a que seja garantida a perpendicularidade relativamente à superfície da amostra.
4. Adicionar a massa necessária à alavanca do sistema, de modo a desenvolver a força selecionada, pressionando o pino contra o disco.
5. Ligar o motor, acionado pelo controlador da SEW Movitrac (figura 3.33), e ajustar a velocidade ao valor necessário, enquanto o pino é impedido de contactar com a amostra.
6. Iniciar o teste com a amostra em contacto com a carga.
7. Remover a amostra no fim de teste e limpar as partículas de desgaste que estejam soltas.  
Voltar a pesar a amostra.

A norma ASTM G99-95a [31] refere que o desgaste deve ser apresentado como perda de volume [ $\text{mm}^3$ ], tanto no pino, como na amostra testada, separadamente. A massa perdida foi convertida através da equação (4):

$$\text{perda de volume } [\text{mm}^3] = \frac{\text{perda de massa } [g]}{\text{densidade } [g/\text{cm}^3]} \times 1000 \quad (4)$$

A velocidade de rotação utilizada nos ensaios de desgaste foi de 350 rpm. Este valor deve-se ao facto da relação de transmissão da máquina *pin-on-disc* utilizada ser de 7 [33] e da velocidade de rotação no veio de saída ser 50 rpm.



Figura 3.32 - Balança AND GR-200



Figura 3.33 - Controlador SEW Movitrac

Imagens das amostras e das ponta do pino foram recolhidas, antes e após os ensaios de desgaste, com recurso ao microscópio Olympus CX40 e a camara digital instalada no microscópio Olympus DP21 (figura 3.34) disponíveis no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL.



Figura 3.34 - Microscópio Olympus CX40 e camara digital Olympus DP21

### 3.5.2 Determinação da força máxima possível exercer na engrenagem helicoidal em estudo

De acordo com Budynas & Nisbett [4], o ponto de aplicação da força localiza-se no plano do passo primitivo e no centro do flanco da engrenagem. Tendo em conta a geometria apresentada na figura 3.35, a força total ( $F$ ) de serviço exercida num dente de uma engrenagem helicoidal, divide-se em 3 componentes, dadas pelas equações (5), (6) e (7):

$$F_r = F_t \times \tan \phi_t \quad (5)$$

$$F_a = F_t \times \tan \psi \quad (6)$$

$$F = \frac{F_t}{\cos \phi_n \times \cos \psi} \quad (7)$$

Em que  $F_r$  é a componente radial,  $F_t$  é a componente tangencial (ou força transmitida),  $F_a$  é a componente axial (ou carga de avanço),  $\phi_n$  é o ângulo de pressão na direção normal,  $\phi_t$  é o ângulo de pressão na direção tangencial e  $\psi$  é o ângulo de hélice.

É conhecido ainda a expressão da componente tangencial e é dada pela equação (8).

$$F_t = \frac{19100 \times P}{d \times n} \quad (8)$$

Em que  $P$  é a potência transmitida à engrenagem [W],  $d$  é o diâmetro da engrenagem [mm],  $n$  é a velocidade de rotação [rot/min] e  $B$  é o binário transmitido [N.m].

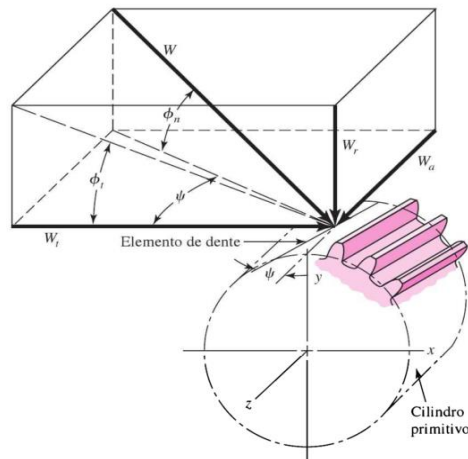


Figura 3.35 - Forças entre dentes atuando sobre uma engrenagem cilíndrica helicoidal de mão direita [4]

Para a realização dos ensaios de desgaste apenas é relevante o cálculo da força total que é possível exercer sobre 1 dente. Primeiro, foi necessário calcular a potência transmitida à engrenagem ( $P$ ) [kW], segundo a equação (9).

$$P = B \times \frac{2 \times \pi \times n}{60} \quad (9)$$

Onde  $B$  é o binário transmitido [Nm] e  $n$  é a velocidade de rotação [rot/min].

Para a determinação do ângulo de hélice  $\psi$ , foi utilizado o *software* Solidworks para o desenho das linhas auxiliares, através de uma fotografia tirada à zona dos dentes, onde foi aplicada a ferramenta de medida, como é verificável na figura 3.36. O valor obtido para  $\psi$  foi de  $11,25^\circ$ .

Visto que a velocidade de rotação  $n$  é de 50 rpm e o binário transmitido  $B$  é 800 N.m, a potência  $P$  é 4,19 kW.

Logo, sabendo que o  $d$  é 210 mm,  $\phi_n$  é  $20^\circ$  e  $\psi$  é de  $11,25^\circ$ ,  $F_t$  é de aproximadamente 7,62 kN, por cada dente. Como tal, a força total  $F$  de serviço, para cada dente, é de 8,27 kN.

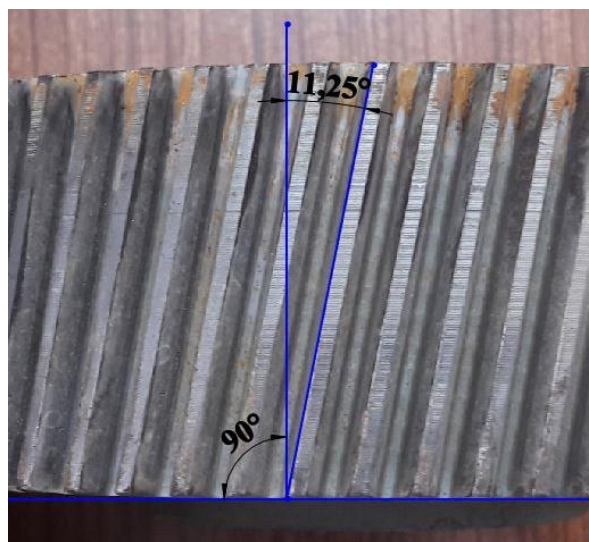


Figura 3.36 - Determinação do ângulo de hélice  $\psi$

### 3.5.3 Calibração dos equipamentos

A máquina de desgaste *pin-on-disc* disponível no Laboratório de PMM do DEMI da FCT-UNL (figura 3.37) apresenta um pino 1 (com um termopar tipo K), que está montado numa alavanca 3, sob o qual uma amostra é feita rodar, encontrando-se esta fixa no suporte 2. A carga a que a amostra é sujeita é colocada no suporte 5, originando uma força normal ( $F_n$ ) na mesma. Os dados da força de atrito ( $F_A$ ) são obtidos através da célula de carga 4. A altura do pino em relação à amostra é regulada através de um contrapeso 6, colocado no lado oposto a onde o pino 1 se encontra.

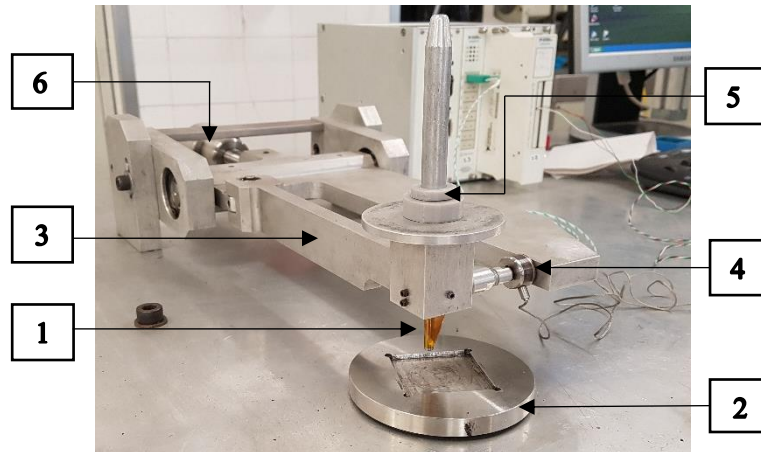


Figura 3.37 –Máquina de testes pin-on-disc

O programa *Determinação da Força e Coeficiente de Atrito e Temperatura* (ver anexos A e B), que foi desenvolvido pelo Senhor Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, foi concebido através do *software* Labview e fornece os dados instantâneos relativos à  $F_A$  que está a ser exercida na superfície da amostra, o respetivo coeficiente de atrito ( $\mu_A$ ) entre a superfície da amostra e a superfície do pino e a temperatura numa zona próxima da ponta do pino ( $T_P$ ).

Os dados lidos pela célula de carga e pelo termopar tipo K são convertidos nas placas da National Instruments SCXI-1314 e SCXI-1112, respetivamente, dispostos no chassis NI SCXI-1000 (figura 3.38). Devido a serem recolhidos 10 dados a cada segundo, decidiu-se tratar os dados obtidos através de um código programado no *software* Matlab (ver anexo C).

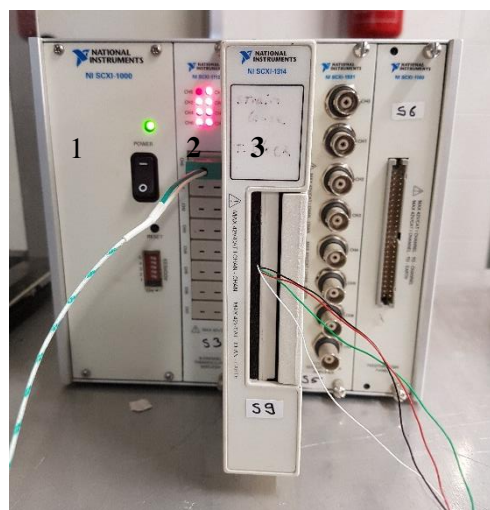


Figura 3.38 - (1) Chassis SCXI-1000; (2) Placa SCXI-1112; (3) Placa SCXI-1314

No que diz respeito à calibração da célula de carga, o canal escolhido na placa SCXI-1314 foi o *Strain Channel*. Este lê a deformação em função da força que é colocada no sensor de carga. O Fator de Calibração (FC) é uma constante e garante que quando é multiplicado pela extensão medida na célula resulta, aproximadamente, a carga que foi imposta na mesma.

Deste modo, para proceder à calibração do equipamento, o FC foi inicialmente considerado de valor unitário 1 (ver anexo A). Foram recolhidos 10 valores de extensão, com intervalo de 10 segundos cada uma, para as cargas de 0 N, 5 N, 10 N, 20 N, 30 N e 35 N, tendo sido de seguida feita a média de cada amostragem (ver anexo D).

Os pesos  $P$  foram dispostos de modo a comprimir a célula de carga (figura 3.39), conseguindo-se assim simular a força de atrito que irá ser lida, possibilitando a sua calibração. A reta de calibração obtida para a célula de carga é apresentada na figura 3.40. O seu FC é de 30190.

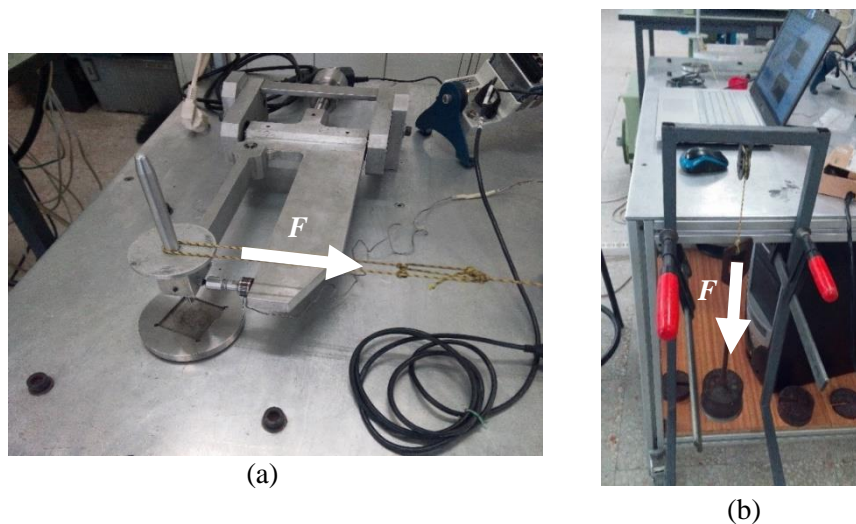


Figura 3.39 – Procedimento experimental de calibração da célula de carga: (a) força  $F$  aplicada na célula de carga; (b) esquema dos pesos impostos no sistema que exercem a força  $F$

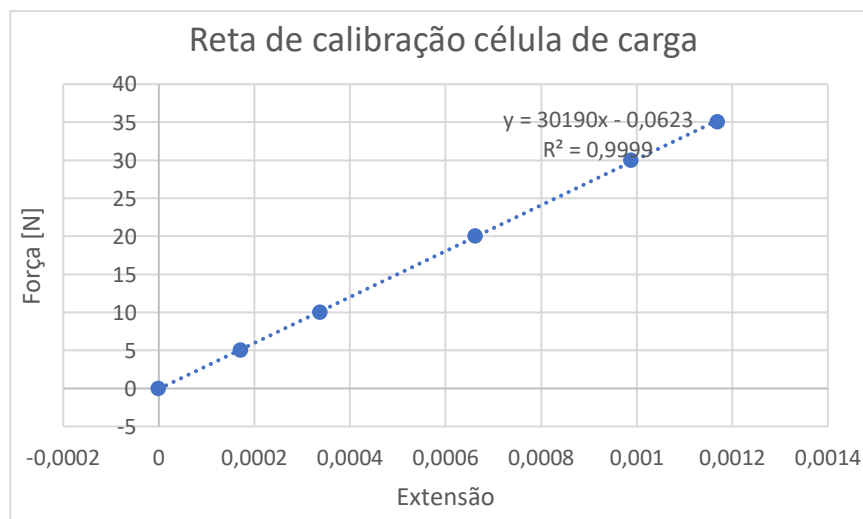


Figura 3.40 - Reta de calibração da célula de carga

A calibração de termopar foi feita com recurso a uma placa de indução, disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL, em que se meteu água a ferver e, à medida que esta ia arrefecendo, foram medidos ao mesmo tempo (figura 3.41), com intervalos de 60 segundos, as temperaturas no termopar e no termómetro, disponíveis no Anexo D. A reta de calibração do termopar encontra-se na figura 3.42. O FC do termopar encontrado é de 0,9822.



Figura 3.41 - Calibração do termopar

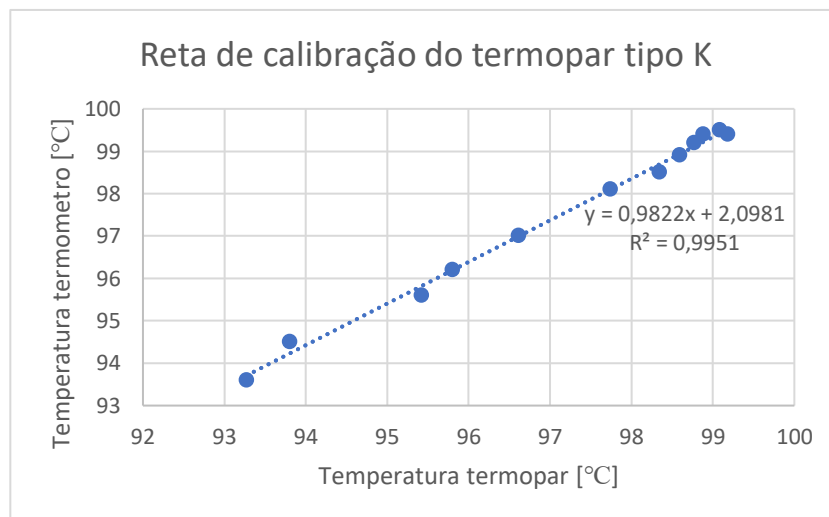


Figura 3.42 - Reta de calibração do termopar tipo K

### 3.5.4 Melhoria da caixa isoladora da máquina de desgaste

Para a realização do ensaio de desgaste com recurso à máquina de *pin-on-disc*, é necessário que o ensaio se realize dentro de uma caixa isoladora. A utilização da referida caixa possibilita um maior controlo da atmosfera, de modo a que esta seja o mais limpa possível, proporcionando um ar escoado que apenas contenha partículas provenientes do desgaste da peça [34].

O equipamento de ensaio de desgaste disponível no Laboratório de PMM do DEMI da FCT-UNL apresentava algumas limitações ao nível da sua estanquicidade. Era composto por uma estrutura em aço, onde nas suas laterais e topo estavam aparafusadas placas em acrílico. A ligação aparafusada não garantia a estanquicidade da caixa, apenas garantia a fixação da estrutura. Como tal, procedeu-se à vedação da caixa, com silicone, tal como é mostrado na figura 3.43 a).

Visto que o teste é feito dentro da referida caixa, teve que se considerar a melhor maneira de posicionar a porta, de modo a garantir boa acessibilidade e também, ao mesmo tempo, que garantisse uma boa estanquicidade. A solução encontrada foi colocar, na parte inferior da caixa, duas dobradiças, permitindo que a porta abra e feche, sem ser preciso retirar a porta. (figura 3.43 b)).

Para garantir o fecho da porta, optou-se por colocar um fecho de alavanca no topo da caixa. Na figura 3.44 é apresentada a caixa, com as alterações efetuadas, na sua posição de serviço. Este trabalho foi desenvolvido em conjunto com o colega do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Ricardo Paulo.

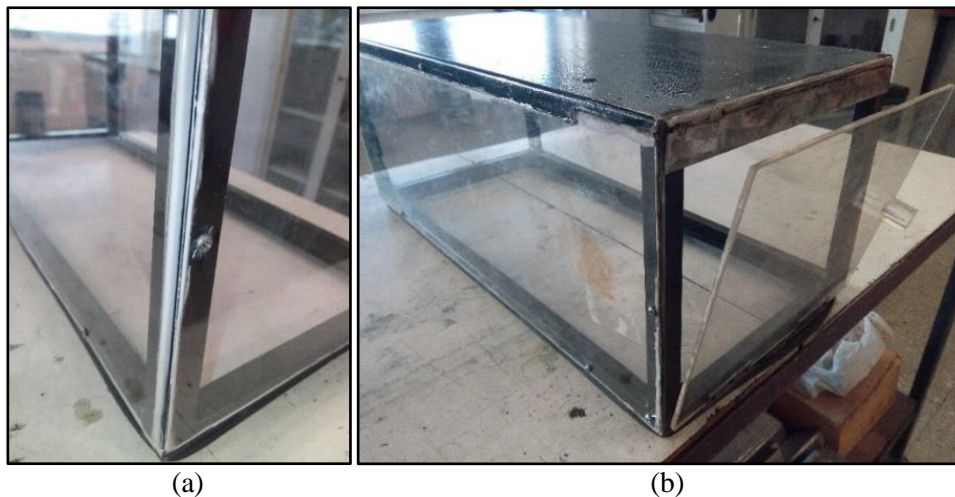


Figura 3.43 - (a) Pormenor da vedação com silicone; (b) Porta apoiada com dobradiças na parte inferior e batente na parte superior



Figura 3.44 - Isolamento da porta com fita de calafetagem e vista da caixa na sua posição de serviço

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### EXPERIMENTAIS

#### 4.1 ENSAIOS DE MICRODUREZA VICKERS

A apresentação e discussão dos resultados respeitantes às durezas Vickers obtidas, no corpo da roda dentada, na zona de contacto dos dentes e na zona de perfil dos dentes, são objeto deste capítulo.

##### 4.1.1 Corpo roda dentada

É apresentado na figura 4.1 a identificação da zona da amostra B2 onde foram efetuadas as indentações e na tabela 4.1 as respetivas medições das diagonais das pirâmides quadrangulares, posições das indentações e os resultados de durezas. O mesmo se segue na figura 4.2 e tabela 4.2, para a amostra B3 e na figura 4.3 e tabela 4.3 para a amostra C3.

O resultado médio obtido para a dureza do material do corpo da roda dentada é de  $294,82_{0,974}^{0,86}$  HV 0,5. De acordo com a norma DIN EN 10084 – *Case Hardening Steels – Technical delivery conditions* [27], para o aço DIN 16MnCr5, a 20 mm da superfície da peça temperada, é expectável que a dureza seja de 31 HRC na escala de Rockwell C, que equivale aproximadamente 292 HV, na escala de Vickers.

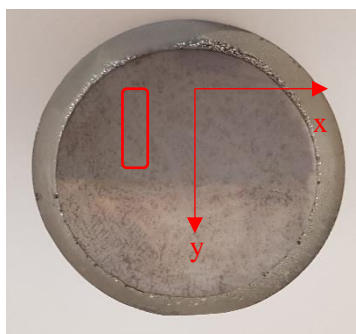


Figura 4.1 - Identificação da zona indentada na amostra B2 e eixo de coordenadas considerado

Tabela 4.1 - Resultados de dureza Vickers da amostra B2

Nº Indentação	x [mm]	y [mm]	D1 [ $\mu$ m]	D2 [ $\mu$ m]	HV
1	0	0,3	57,78	56,72	282,9
2	0	0,6	56,13	56,05	294,7
3	0	1,2	57,38	56,12	287,9
4	0	1,5	56,14	55,59	297,1
5	0	1,8	55,52	54,62	305,8
6	0	2,7	55,45	54,70	305,7
Média					<b>295,68</b>
Desvio Padrão					<b>9,27</b>
Intervalo de Confiança 95%					7,42



Figura 4.2 - Identificação da zona indentada na amostra B3 e respetivo eixo de coordenadas

Tabela 4.2 - Resultados de dureza Vickers da amostra B3

Nº Indentação	x [mm]	y [mm]	D1[ $\mu$ m]	D2 [ $\mu$ m]	HV
1	0	0,3	56,51	55,41	296,1
2	0	0,6	56,67	56,3	290,6
3	0	0,9	55,87	55,72	297,8
4	0	1,5	57,91	55,95	286,1
5	0	1,8	56,69	55,98	292,2
6	0	55,25	55,9	300,3	
Média					<b>293,85</b>
Desvio Padrão					<b>5,21</b>
Intervalo de confiança 95%					<b>4,17</b>

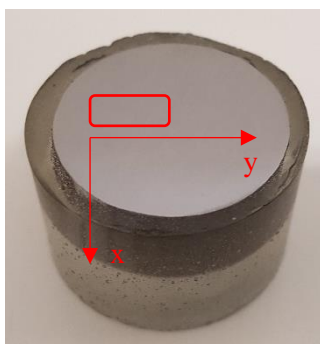


Figura 4.3 - Identificação da zona indentada na amostra C3 e respetivo eixo de coordenadas

Tabela 4.3 - Resultados de dureza Vickers da amostra C3

Nº Indentação	x [mm]	y [mm]	D1 [ $\mu$ m]	D2 [ $\mu$ m]	HV
1	0	0	55,8	55,76	298
2	0	0,6	55,59	55,94	298,2
3	0	0,9	56,38	56,05	293,4
4	0	1,5	56,15	57,06	289,4
5	0	1,8	55,76	56,48	294,4
6	0	2,4	55,59	56,3	296,2
Média					<b>294,93</b>
Desvio Padrão					<b>3,31</b>
Intervalo de Confiança 95%					<b>2,65</b>

### 4.1.2 Dentes roda dentada

Nesta secção, serão primeiro analisados os resultados relativos à zona da cabeça dos dentes A, B e C. É apresentado na figura 4.4 a zona da cabeça do dente A indentada, bem como o respetivo eixo de coordenadas considerado, e na tabela 4.4 as respetivas medições das diagonais de Vickers e durezas de Vickers, no dente A.

O mesmo é apresentado para o dente B, na figura 4.5 e na tabela 4.5, e para o dente C, na figura 4.6 e tabela 4.6.

Pela análise das tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 é possível verificar a diferença entre os resultados médios de dureza Vickers obtidos para o dente A (468,85 HV), em relação ao dente B (646,24 HV) e dente C (696,95 HV). Esta diferença pode dizer respeito ao facto de ter existido erro humano na fase de polimento, na preparação das amostras. Neste caso, os dentes B e C podem ainda conter uma espessura considerável de material cementado em relação ao dente A. Outra possibilidade prende-se com o facto de existirem dentes que apresentam fraturas, como se pode ver na figura 4.7. Pode estar-se na presença de dentes que tenham sofrido mais deformação e desgaste, que será o caso do dente A.

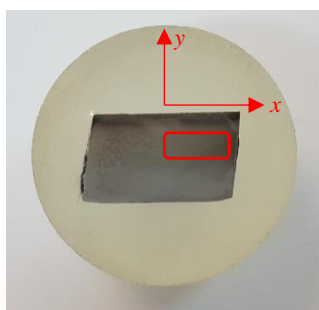


Figura 4.4 - Identificação da zona indentada no dente A e respetivo eixo de coordenadas

Tabela 4.4 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente A

Nº Indentação	x [mm]	y [mm]	D1 [ $\mu$ m]	D2 [ $\mu$ m]	HV
1	0	0	44,59	44,8	464,2
2	0,6	0	44,51	44,6	467,1
3	0,9	0	44,59	44,04	472,1
4	1,2	0	44,81	43,91	471,1
5	1,5	0	44,09	44,7	470,4
6	1,8	0	44,86	44,59	463,6
7	2,1	0	44,59	44,41	468,2
8	2,4	0	44,06	44,39	474,1
Média					<b>468,85</b>
Desvio Padrão					<b>3,75</b>
Intervalo de confiança 95%					<b>2,60</b>

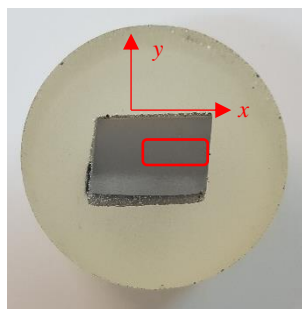


Figura 4.5 - Identificação da zona indentada no dente B e respetivo eixo de coordenadas

Tabela 4.5 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente B

Indentação	x [mm]	y [mm]	D1 [ $\mu\text{m}$ ]	D2 [ $\mu\text{m}$ ]	HV
1	0	0	37,31	37,15	668,9
2	0,3	0	38,65	38,02	630,8
3	0,6	0	38,26	38,44	630,6
4	0,9	0	37,54	38,03	649,5
5	1,8	0	37,87	37,4	654,6
6	2,1	0	37,88	38,26	639,8
7	2,4	0	38,18	37,45	648,4
8	2,7	0	37,84	37,85	647,3
Média					<b>646,24</b>
Desvio Padrão					<b>12,67</b>
Intervalo confiança 95%					<b>8,78</b>

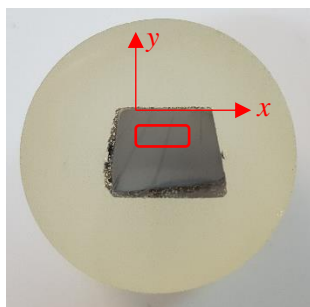


Figura 4.6 - Identificação da zona indentada no dente C e respetivo eixo de coordenadas

Tabela 4.6 - Resultados de dureza Vickers na zona da cabeça do dente C

Indentação	x [mm]	y [mm]	D1 [ $\mu\text{m}$ ]	D2 [ $\mu\text{m}$ ]	HV
1	0	0	35,72	37,04	700,6
2	0,3	0	36,05	36,84	698,2
3	0,6	0	35,98	37,05	695,6
4	0,9	0	36,19	36,9	694,3
5	1,2	0	36,51	36,54	695,1
6	1,8	0	35,88	36,93	699,6
7	2,4	0	35,79	37,13	697,6
8	2,7	0	36,02	37,05	694,6
Média					<b>696,95</b>
Desvio Padrão					<b>2,39</b>
Intervalo de confiança 95%					<b>1,66</b>

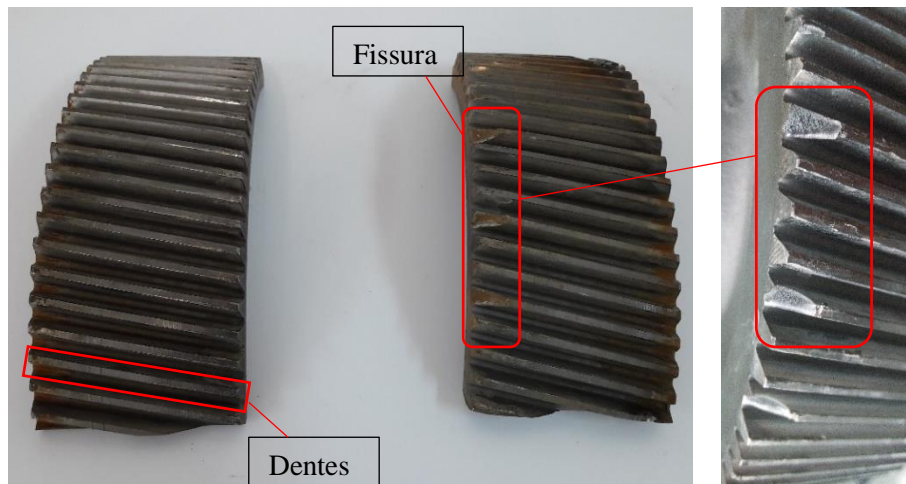


Figura 4.7 - Fissuras nos dentes da engrenagem

De seguida, foi estudada a variação da dureza Vickers, ao longo da zona de perfil dos dentes E, F e H.

Na figura 4.8 é identificada a zona onde as indentações foram efetuadas no perfil do dente E e o respetivo eixo de coordenadas considerado. Com os vários valores obtidos, ao longo do perfil, foi traçado um gráfico (figura 4.9) que relaciona a dureza Vickers com o aumento da distância em relação ao topo do dente E. Conclui-se que, à medida que a distância ao topo do dente E aumenta, a dureza do material vai diminuindo.

Na figura 4.10 está representada a zona onde foram efetuadas as indentações ao longo do perfil do dente F, com o respetivo eixo de coordenadas considerado.

Na figura 4.11 é apresentado um gráfico que representa a variação da dureza Vickers ao longo da profundidade do dente F. Através da análise do referido gráfico, é possível observar uma variação da dureza superior a 500 HV até cerca de 1mm do topo do dente F, sendo que a partir daí os valores diminuem até 417,5 HV.

Na figura 4.12 é identificada a zona do perfil do dente H onde as indentações foram realizadas e o respetivo eixo de coordenadas considerado. Com os valores de dureza recolhidos, foi traçado um gráfico (ver figura 4.13) que relaciona a dureza Vickers com o aumento da distância ao topo do dente H. É notório uma grande diminuição da dureza do material até a cerca de 1mm do topo do dente H, seguindo depois os valores para uma estabilização.

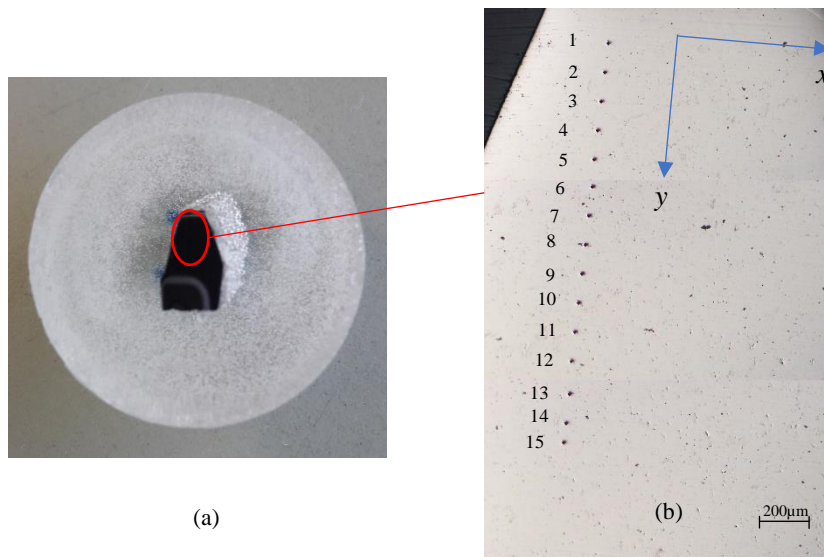


Figura 4.8 - Identificação da zona da indentação no dente E: (a) – dente E com a zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração

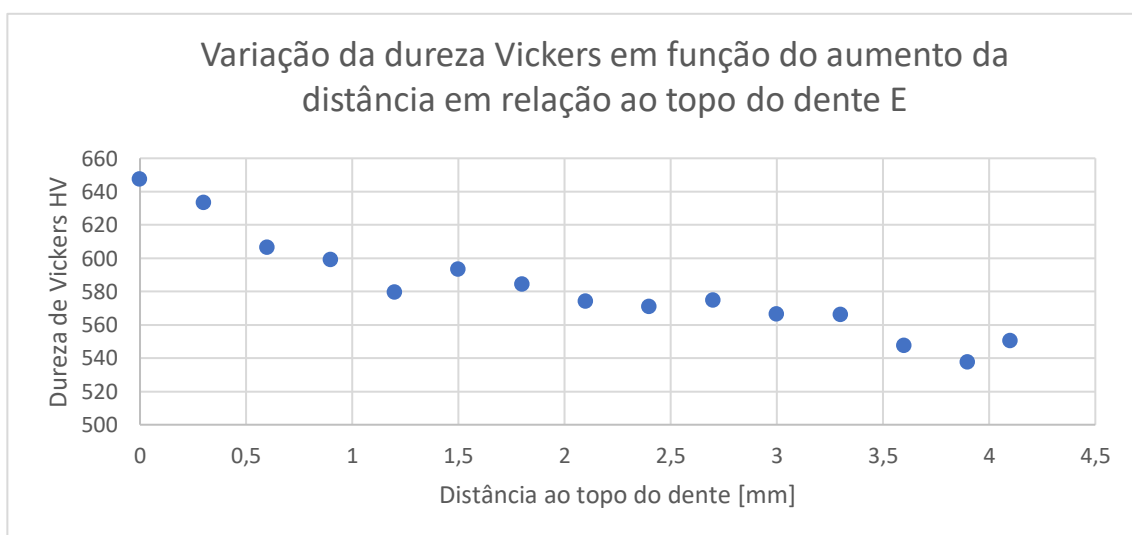


Figura 4.9 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente E

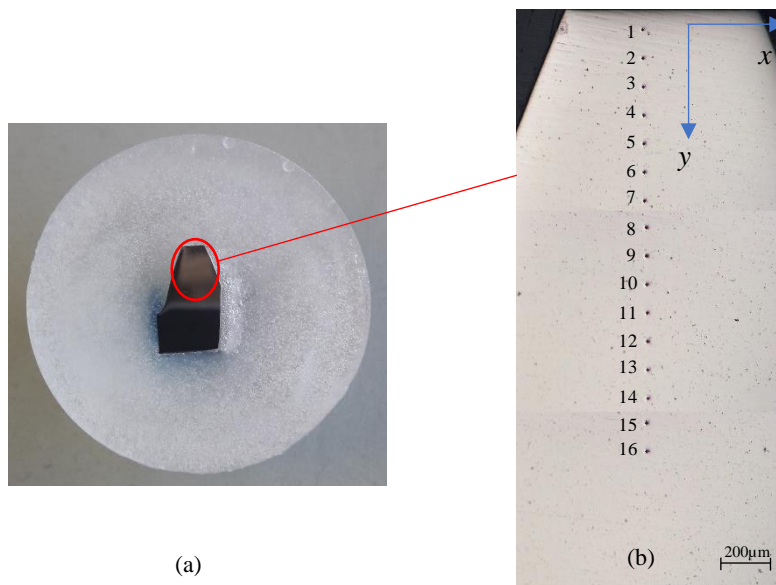


Figura 4.10 - Identificação da zona da indentação no dente F: (a) – dente F com a zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração

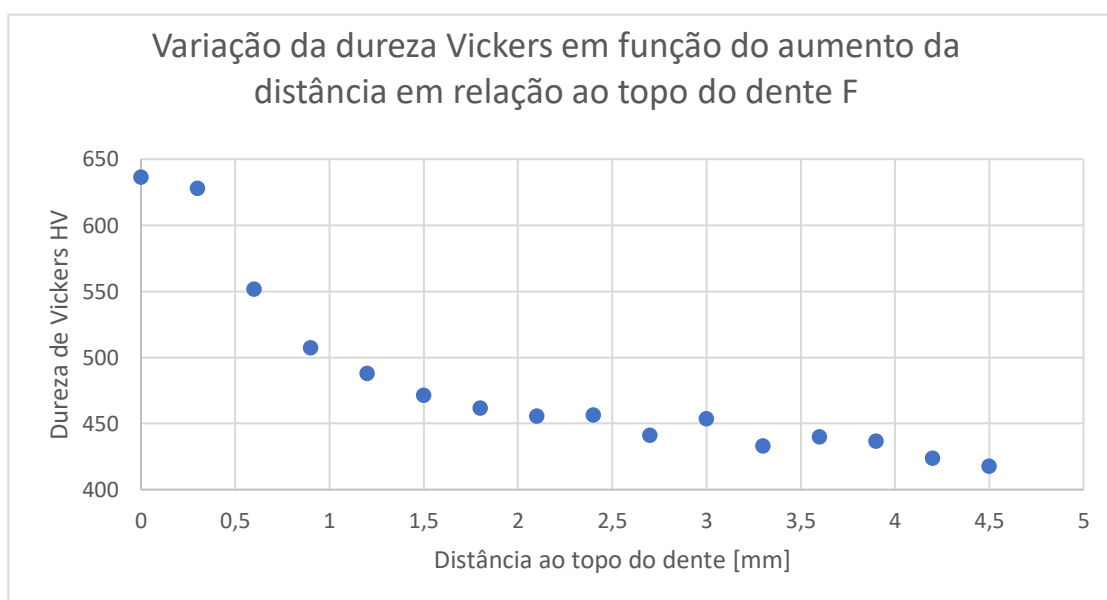


Figura 4.11 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente F

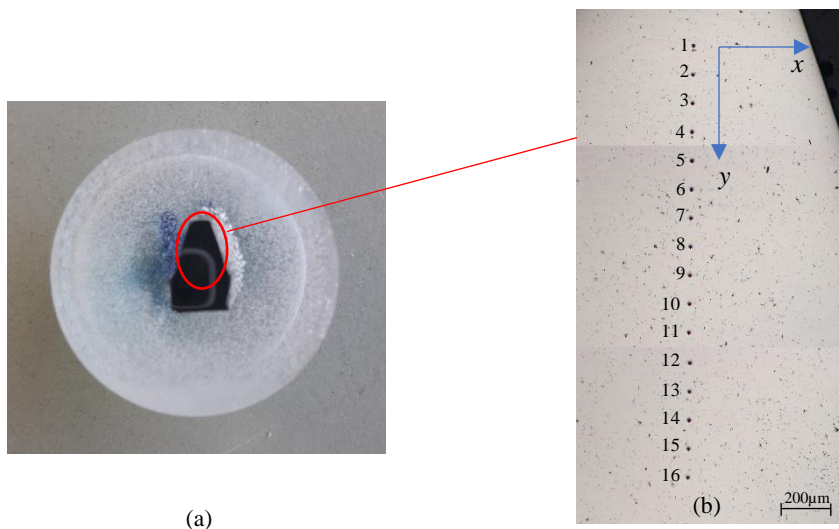


Figura 4.12 - Identificação da zona da indentação no dente H: (a) – dente H com a zona indentada identificada; (b) – vista aproximada das indentações efetuadas, com a respetiva numeração

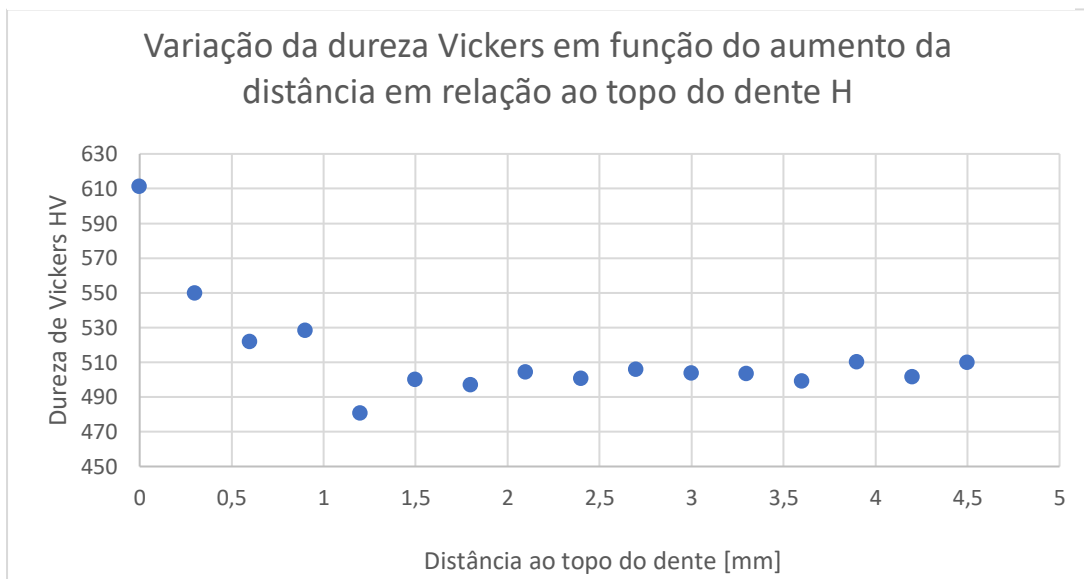


Figura 4.13 - Variação da dureza Vickers em função do aumento da distância em relação ao topo do dente H

É possível concluir que existe uma diminuição da dureza ao longo do perfil dos dentes E, F e H, tal como era espectável. A dureza Vickers nos dentes analisados começa entre os valores de 600 HV a 650 HV, que vão diminuindo até, aproximadamente, 1mm do topo do dente.

É de notar que os resultados de dureza muito elevada à superfície são bastante próximos do que foi observado na secção 4.1.1, na análise da zona da cabeça dos dentes B e C.

À medida que se avança no perfil do dente existe uma estabilização geral dos valores de dureza Vickers (580 – 540 HV no dente E, 470-410 HV no dente F e cerca de 500 HV no dente H). Os valores desta estabilização diferem de dente para dente pelas razões que já foram apontadas no início desta secção.

## 4.2 ANÁLISE DE DEFEITOS

São apresentadas nas figuras 4.14 a 4.17 os gráficos que separam por intervalos as áreas dos defeitos observados, pela frequência com que foram detectados, nas amostras A1, A2, A3 e A4, respectivamente.

Na amostra A1, a grande percentagem de defeitos observados (81,6%) tem uma área compreendida entre  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2]$ .

Os defeitos observados com maior incidência na amostra A2 estão compreendidos num intervalo de área entre  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$  e representam cerca de 44,4% da amostra observada. Ainda de referir a deteção de 7 defeitos que apresentam uma área superior a  $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ .

Na amostra A3 é de destacar a grande incidência de defeitos com áreas entre  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$  (47,3%) e  $[1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2]$  (35,1%).

Na amostra A4 os defeitos observados com mais frequência têm áreas compreendidas entre  $[1 \times 10^{-7} \text{ e } 1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2]$  (32,4%) e  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$  (48,2%).

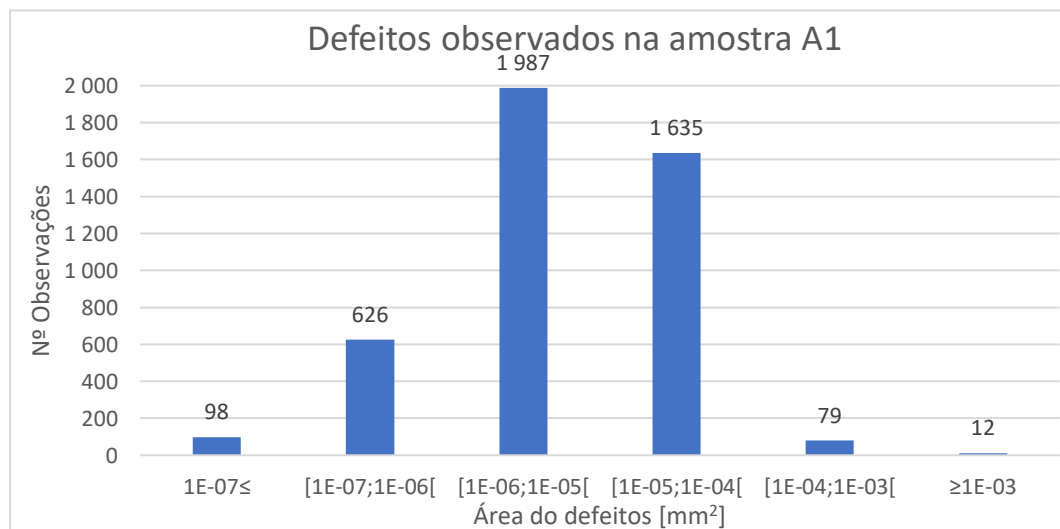


Figura 4.14 - Defeitos observados na amostra A1

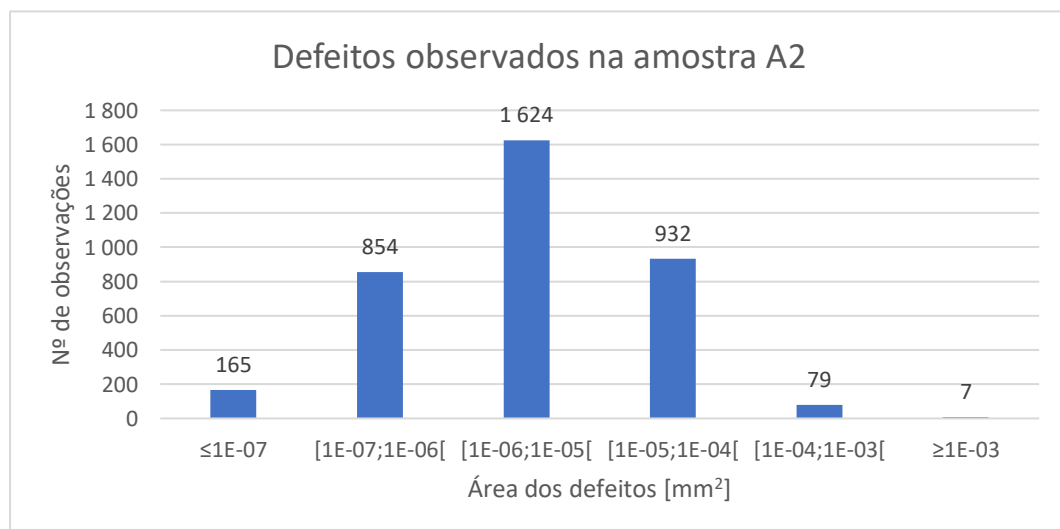


Figura 4.15 - Defeitos observados na amostra A2

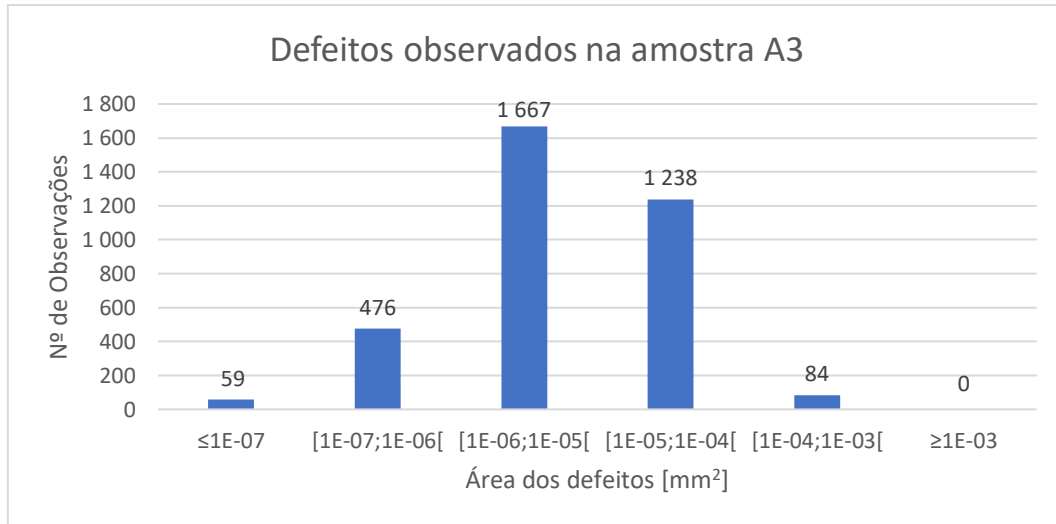


Figura 4.16 - Defeitos observados na amostra A3

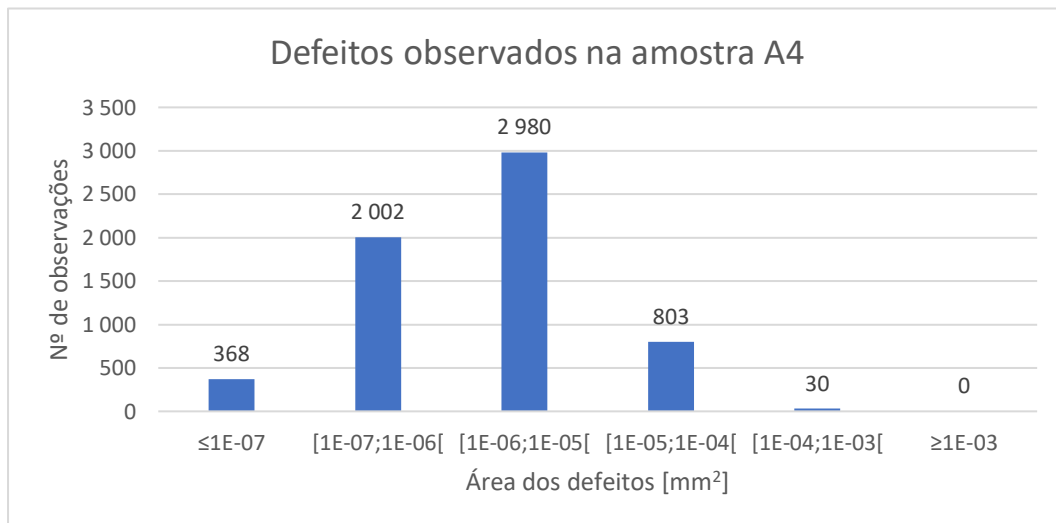


Figura 4.17 - Defeitos observados na amostra A4

Pode ser concluído desta análise que a grande maioria dos defeitos observados, nas quatro amostras, estão compreendidos num intervalo entre  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$  (representado cerca de 46,38% do total de 17805 defeitos observados), seguidos de defeitos com intervalos de área de  $[1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2]$  e  $[1 \times 10^{-7} \text{ mm}^2 \text{ e } 1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2]$  em que representam 25,88% e 22,23% das observações feitas, respetivamente.

O *software* Image J apresenta algumas limitações no que toca à análise de defeitos acima mencionada. Este não consegue distinguir entre um risco proveniente do erro do polimento mecânico manual e um defeito inerente ao próprio processo de fabrico associado, apenas distingue a tonalidade de cores diferentes (figura 4.18). Isto implica que, ao tentar-se atenuar o risco, os próprios defeitos começam a desaparecer, introduzindo um erro na contagem de defeitos.

A mesma questão é colocada quando existem sujidades e óxidos que estejam presentes na superfície a ser observada, provenientes de má limpeza e acondicionamento das amostras após o seu polimento. Como se verifica na figura 4.19, no primeiro caso uma sujidade é considerada um defeito e no segundo caso o *software* ignora a sujidade.

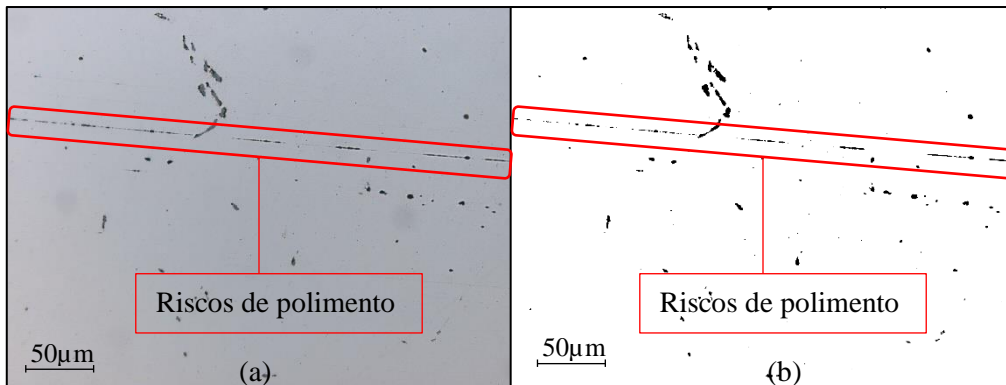


Figura 4.18 – Exemplo de riscos provenientes de polimento mecânico. (a) imagem retirada de microscópio ótico invertido; (b) imagem com threshold

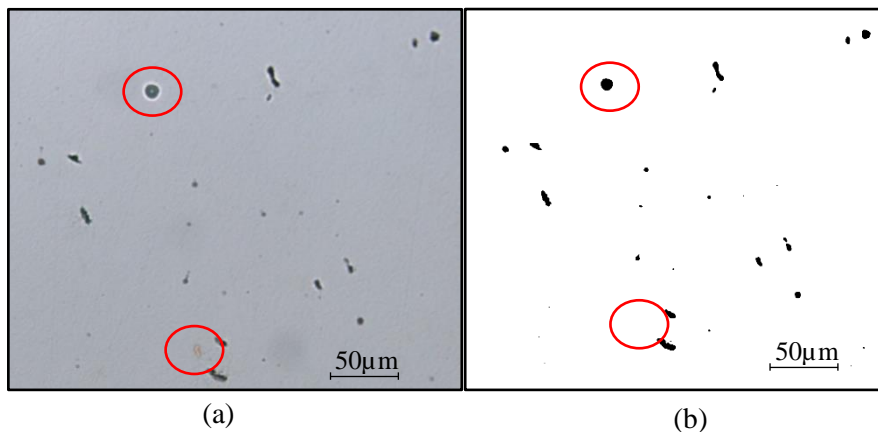


Figura 4.19 - Exemplo de sujidades presentes numa amostra: (a) imagem retirada de microscópio ótico invertido; (b) imagem com threshold

Estes dois erros referidos levam a que algumas amostras sejam excluídas da análise, embora seja um compromisso difícil de atingir, isto é, removendo alguns riscos ou sujidades na sua totalidade, pode estar a eliminar-se por completo outros defeitos, aumentando assim o erro dos resultados que serão obtidos.

## 4.3 ENSAIOS DE DESGASTE

### 4.3.1 Ensaios realizados a seco

O primeiro ensaio realizado a seco (Ensaio-1) teve duração de 50 minutos e baseou-se na aplicação da carga de 41,14 N, com interrupções a cada 10 minutos, para a pesagem da amostra e do pino, com o objetivo de encontrar taxas de perda de volume de material, tanto para a amostra como para o pino.

Os resultados deste ensaio são apresentados no gráfico da figura 4.20. É de notar que, durante os primeiros 10 minutos de ensaio foi registado uma maior perda de volume na amostra. A tendência da taxa de perda de volume na amostra é dada pela equação (10).

$$\Delta V_a = 0,0018 \times t + 0,0183 \quad (10)$$

No que diz respeito ao pino, a perda de volume registada manteve-se sempre um crescimento linear durante o ensaio. A equação (11) traduz a tendência da taxa de perda de volume no pino.

$$\Delta V_p = 0,0015 \times t - 0,0024 \quad (11)$$

Em que  $\Delta V_a$  é a perda de volume na amostra [ $\text{mm}^3$ ],  $\Delta V_p$  é a perda de volume no pino [ $\text{mm}^3$ ] e  $t$  o instante de tempo de medição de dados [minutos].

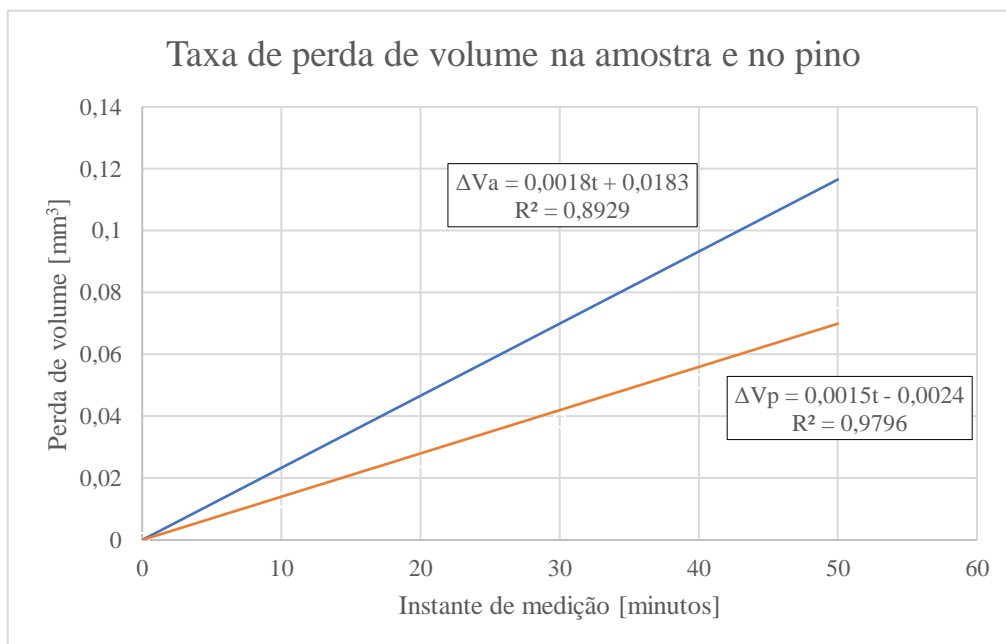


Figura 4.20 - Perda de volume na amostra e no pino, com carga aplicada de 41.14N, durante 50 minutos (Ensaio-1)

Na figura 4.21 (a) a (e), é apresentada a sequência de imagens das observações que foram feitas à pista de desgaste da amostra, à medida que o ensaio foi parado de 10 em 10 minutos para esta ser pesada. Estas imagens foram obtidas com recurso ao microscópio Olympus CX40 e a camera digital instalada Olympus DP2, disponíveis no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL. Na observação destas imagens, é de notar um aumento da área da pista de contacto, no decorrer do ensaio, provavelmente devido ao facto de a ponta do pino ir ficando cada vez mais plana, aumentando assim a área de contacto com a amostra. É de assinalar ainda que a pista de desgaste apresentou umas zonas mais cinzentas, provavelmente devido a um contacto de escorregamento, entre o pino e amostra, e outras zonas mais escuras (cinzento quase preto) que revelou arrancamento de material que aderiu às zonas laterais da pista de desgaste, representando o que poderá ser localmente o fenómeno de *scuffing* (descrito na secção 2.3.2).

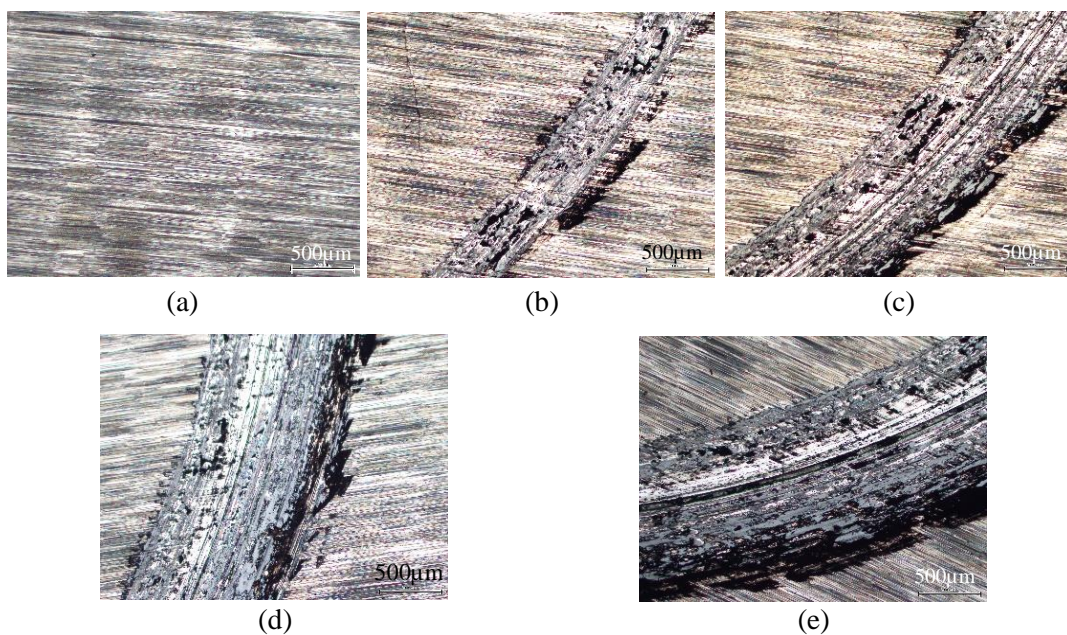


Figura 4.21 - Observações feitas à mesma zona da pista de desgaste durante o Ensaio-1: (a) início do ensaio; (b) 10 minutos; (c) 20 minutos; (d) 30 minutos e (e) 40 minutos

Também para o pino, é apresentada na figura 4.22 de (a) a (e) a sequência de imagens, observadas ao longo das paragens do ensaio. De referir que na figura 4.22 (a), devido à superfície arredondada do pino, a mesma é difícil de ser focada. No entanto, no decorrer do ensaio, esta superfície tende a ficar plana e apresenta as linhas/pistas de escorregamento. As zonas escuras apresentadas na figura 4.22 correspondem ao mesmo tipo de comportamento ao desgaste que foi observado para a amostra (ver figura 4.21).

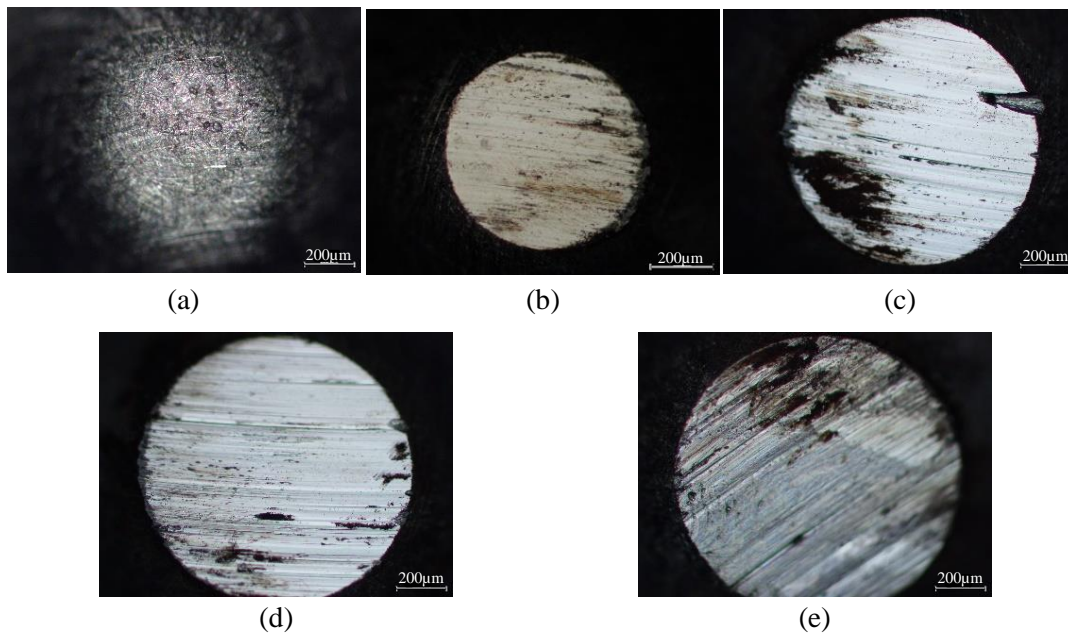


Figura 4.22 - Observações feitas ao pino durante o Ensaio-1: (a) início do ensaio; (b) 10 minutos; (c) 20 minutos; (d) 30 minutos e (e) 40 minutos

Foram realizados, também, quatro ensaios a seco, com a duração de 40 minutos, com o objetivo de analisar o comportamento do material em relação a quatro cargas diferentes aplicadas: 16,93 N, 30,84 N, 34,35 N e 41,14 N (Ensaio-2). Na figura 4.23 é apresentado o gráfico dos resultados da tendência da perda de volume na amostra e no pino. É verificável o aumento da perda de volume na amostra, à medida que é imposta uma carga maior na mesma. O valor de perda de volume no pino com o primeiro carregamento de 16,93 N é de  $0,026 \text{ mm}^3$ , crescendo nos segundo e terceiro carregamentos (30,84 N e 34,35 N), onde se manteve constante no valor de  $0,051 \text{ mm}^3$  e no quarto carregamento (41,14 N) registou um crescimento para o valor máximo de perda de volume de  $0,462 \text{ mm}^3$ . Esta diferença, pode ser devida ao facto de, durante estes ensaios, para verificar os parâmetros a usar, as pontas dos pinos foram várias vezes arredondadas, por processo manual, recorrendo ao uso de uma lima.

Da comparação dos resultados apresentados nas figuras 4.20 e 4.23, referentes, respetivamente, aos ensaios com paragens de 10 em 10 minutos (Ensaio-1) com os de variação da carga aplicada (Ensaio-2), pode observar-se que as perdas de volume registadas na amostra são substancialmente diferentes, ou seja, para a mesma carga de 41,14 N, no instante 40 minutos, as perdas de volumes foram respetivamente, de  $0,090 \text{ mm}^3$  e de  $0,731 \text{ mm}^3$ . Esta disparidade é de 87,7% e provavelmente deve-se ao facto de no Ensaio-1 ter sido garantida a limpeza total da amostra e do pino.

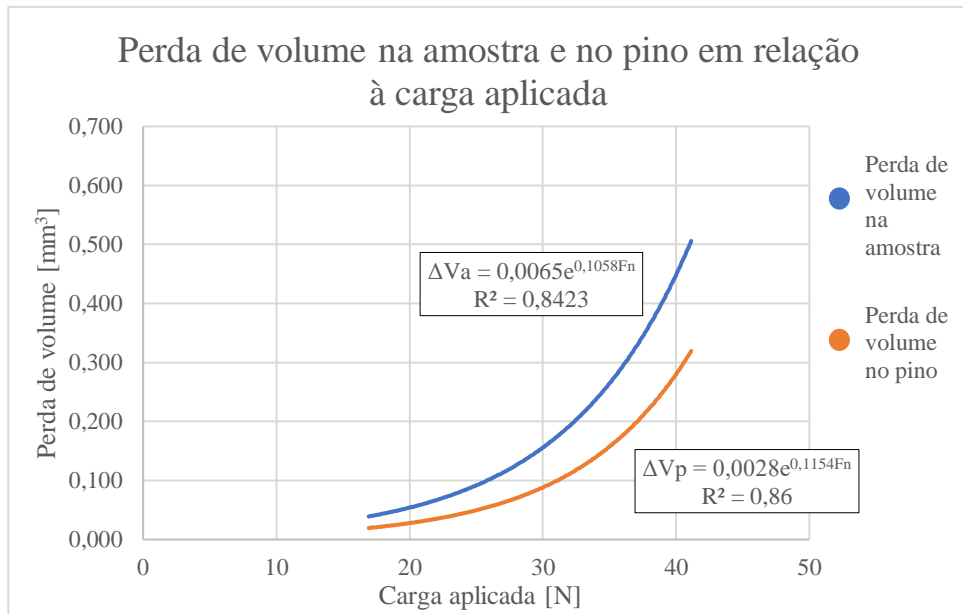


Figura 4.23 - Perda de volume da amostra e do pino em relação à carga aplicada, durante 40 minutos (Ensaio-2)

Com o Ensaio-2, foi possível concluir, que as relações entre a perda de volume na amostra ( $\Delta V_a$ ) e no pino ( $\Delta V_p$ ), em relação à carga  $F_N$  aplicada no pino, de acordo com as equações (12) e (13), respectivamente, seguem distribuições exponenciais.

$$\Delta V_a = 0,0065 \times e^{0,1058 \times F_N} \quad (12)$$

$$\Delta V_p = 0,0028 \times e^{0,1154 \times F_N} \quad (13)$$

Nas figuras 4.24 a 4.27 é possível observar as imagens obtidas das pistas de desgaste na amostra e na ponta do pino, referente ao Ensaio-2. As pistas de desgaste de todas as amostras apresentam arrancamento de material, identificado pelas zonas escuras apresentadas. O movimento de escorregamento da amostra sob o pino é evidente, sobretudo na imagem da figura 4.27a), observados nos riscos provocados pelo movimento de rotação. No pino apenas em algumas zonas esteve presente este fenómeno de arrancamento de material, sendo muito mais visível no pino o movimento de escorregamento que a amostra exerce, ou seja, desgaste por abrasão. No entanto, com a carga de 41,14 N aplicada, já foi identificado uma maior presença de desgaste por adesão na superfície do pino, após o ensaio.

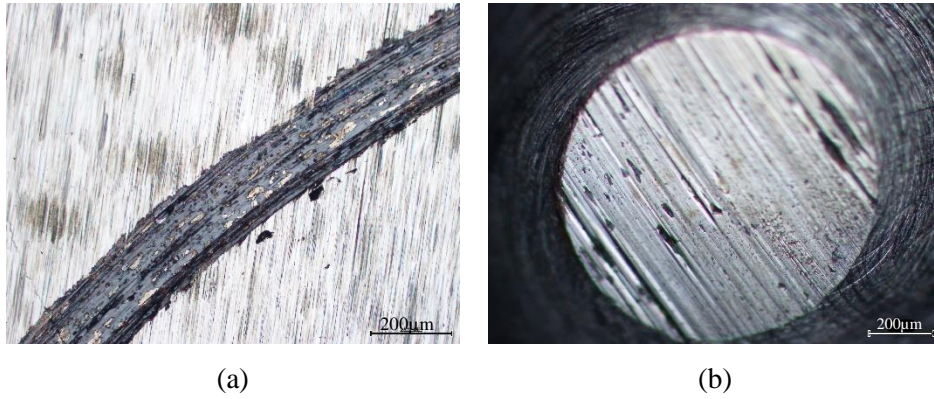


Figura 4.24 - Ensaio a seco com carga aplicada de 16,93N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino

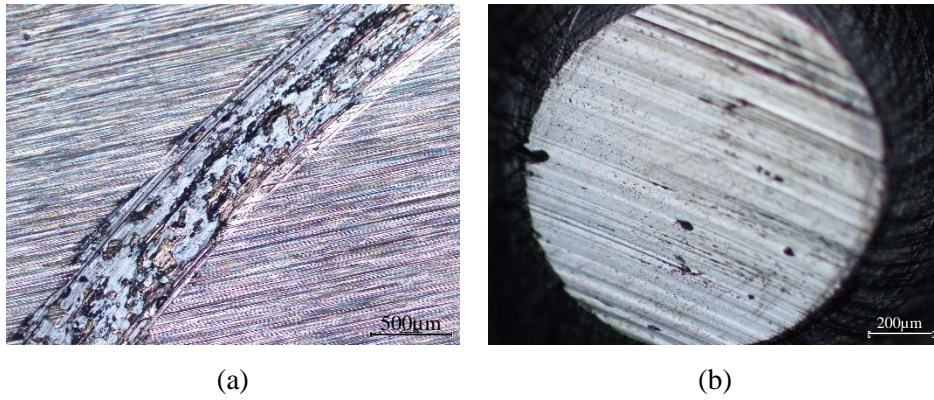


Figura 4.25 - Ensaio a seco com carga aplicada de 30,84N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino

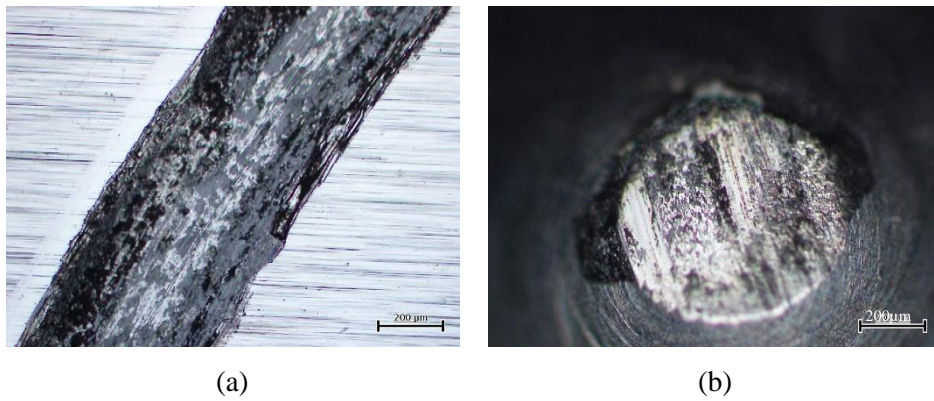


Figura 4.26 - Ensaio a seco com carga aplicada de 34,35N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino

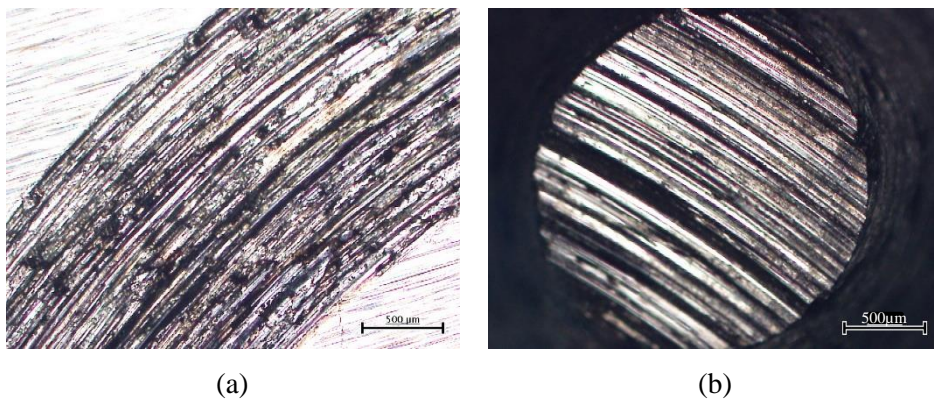


Figura 4.27 - Ensaio a seco com carga aplicada de 41,14N: (a) pista de desgaste da amostra; (b) superfície do pino

Nas figuras 4.28 a 4.30 são apresentados os gráficos da variação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura medida em zona próxima da ponta do pino, em relação às forças aplicadas de 16,93 N, 30,84 N, 34,35 N e 41,14 N, respetivamente (Ensaio-2). Na análise destes resultados, é verificável a tendência, nos quatro gráficos ao longo dos ensaios, de aumento da força de atrito na fase inicial, o que, provavelmente, indicia o escorregamento da superfície da amostra sobre o pino, seguido da penetração da ponta do pino na superfície da amostra, e constata-se que a força de atrito atinge os valores máximos nos ensaios. Observa-se após cerca de 300 segundos de ensaio, uma tendência para valores constantes de força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura na ponta do pino. Tendo em conta que este ensaio foi realizado a seco, era previsível que os resultados do coeficiente de atrito atingissem valores elevados, no intervalo [0,5 e 0,75]. Quando aplicadas as forças de 30,84 N e 41,14 N, pontualmente os valores resultantes do coeficiente de atrito estão compreendidos entre 0,8 e 0,9.

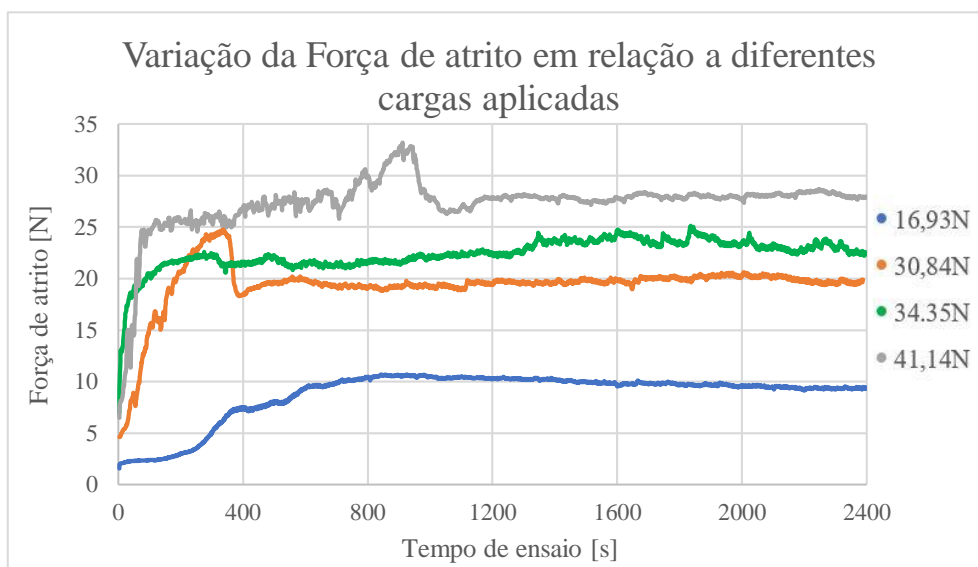


Figura 4.28 - Força de atrito registada em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaio 2

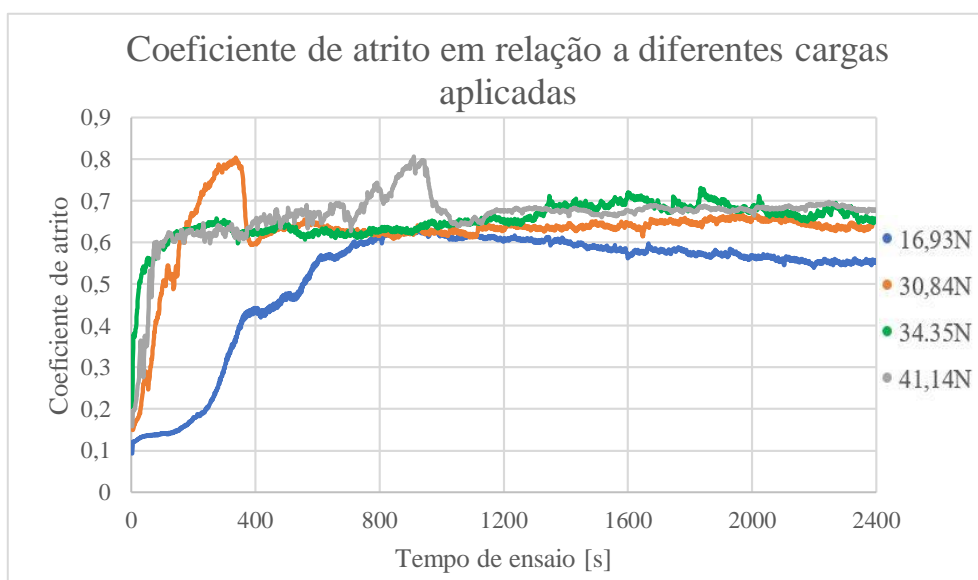


Figura 4.29 - Coeficiente de atrito registado em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaio 2

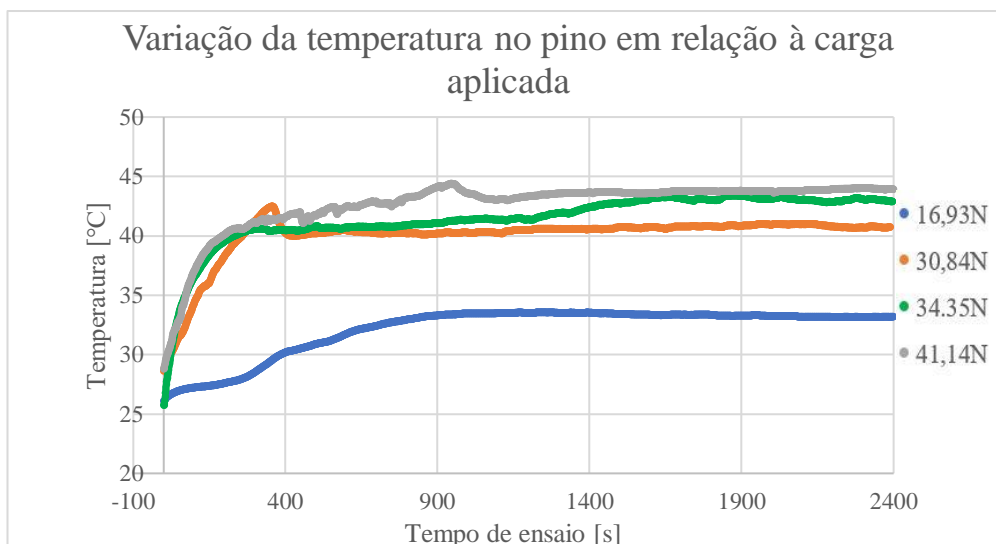


Figura 4.30 - Temperatura em zona próxima da ponta do pino em relação a diferentes cargas aplicadas – Ensaios 2

### 4.3.2 Ensaios realizados com lubrificante usado

Na tabela 4.7 estão indicados os resultados de perda de massa e de volume das amostras B1, B4 e H4, respetivamente, para os ensaios realizados com lubrificante usado.

Os resultados obtidos de perda de volume apresentam valores semelhantes entre as 3 amostras, mas inferiores quando comparados com os resultados dos ensaios realizados a seco, Ensaios-2, (figura 4.23), como esperado. Considerando o valor de perda de volume registada no ensaio realizado a seco, Ensaios-2, (figura 4.23) com carga de 16,93 N ( $0,051 \text{ mm}^3$ ) com a carga aplicada de, aproximadamente, 4,9 vezes maior (82,75 N) no ensaio com lubrificante usado (tabela 4.7), apenas se registou uma perda de volume de 49% menor, considerando os valores da amostra B1 e/ou H4 de perda de volume de  $0,026 \text{ mm}^3$ .

Tabela 4.7 - Valores de massa iniciais e finais e perdas de volume registados nas amostras B1, B4 e H4 e no pino

	Medição de massa [g]				Perda de volume [ $\text{mm}^3$ ]	
	Amostra		Pino		Amostra	Pino
	Inicial	Final	Inicial	Final		
<b>B1</b>	33,4797	33,4795	5,9992	5,9991	0,026	0,013
<b>B4</b>	30,9584	30,9581	6,0121	6,0119	0,038	0,026
<b>H4</b>	20,9365	20,9363	6,0260	6,0258	0,026	0,026

Da figura 4.31 a 4.33, são apresentados os gráficos dos resultados obtidos da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura na zona perto da ponta do pino, nos ensaios realizados com as amostras B1, B4 e H4, respetivamente. Os gráficos da força de atrito e do coeficiente de atrito dos ensaios realizados com lubrificante usado têm várias diferenças quando comparando com os gráficos dos ensaios realizados a seco – Ensaios 2 – (figuras 4.28, 4.29 e 4.30). Os resultados das forças de atrito e do coeficiente de atrito (ver figuras 4.31, 4.32) apresentam valores praticamente constantes durante todo o ensaio. No caso mais severo registado, o da amostra B1, a força de atrito máxima registada foi

cerca de 11 N (figura 4.31), para uma carga normal aplicada de 82,75 N, que coincidiu com a força de atrito máxima no caso do ensaio a seco com a menor carga testada de 16,93 N (figura 4.28). Já para a carga mais severa testada a seco, 41,14 N, (figura 4.28) a maior força de atrito registada foi cerca de 63,3% superior à com lubrificante. Em relação aos resultados do coeficiente de atrito registado no ensaio com lubrificante usado, também estão dentro do espectável (0,13, 0,1 e 0,12, para as amostras B1, B4 e H4, respetivamente); ou seja, segundo os autores Rodrigues & Martins [20], para valores de coeficiente de atrito entre  $(0,1 < \mu_A < 0,4)$  indicia a presença de uma lubrificação de fronteira. Este regime de lubrificação caracteriza-se por existirem zonas da película de lubrificante destruídas e, como tal, existe contacto entre as superfícies.

As figuras 4.34 a 4.36, apresentam as imagens obtidas, com recurso à camera Olympus DP21 associada ao microscópio Olympus CX40 (figura 3.34) disponível no Laboratório de CM do DEMI da FCT-UNL, das superfícies das amostras B1, B4 e H4 respetivamente, e da ponta do pino, antes e após a realização destes ensaios. São visíveis as entre estas imagens e as imagens das superfícies das amostras dos ensaios a seco referentes ao Ensaio-2 (figuras 4.24 a 4.27); as superfícies das amostras dos ensaios realizados com lubrificante usado encontram-se menos riscadas, sugerindo apenas desgaste por abrasão e as imagens do pino não apresentam desgaste significativo.

No que diz respeito à temperatura medida em zona perto da ponta do pino (figura 4.33), esta seguiu a mesma tendência que nos ensaios realizados a seco, Ensaio-2, (figura 4.30). Os resultados obtidos das temperaturas mostram uma subida nos primeiros segundos, tendendo a estabilizar durante o resto do ensaio; o maior valor registado foi de 33°C na amostra B1 (figura 4.33), que foi também a amostra a apresentar o maior valor medido da força de atrito (11 N) e consequentemente o maior valor do coeficiente de atrito (0,13) (ver figuras 4.31 e 4.32).

Comparando com os valores medidos nos ensaios a seco, Ensaio-2, (figura 4.30), para a carga mais severa de 41,14 N, a maior temperatura registada foi cerca de 45°C e nos ensaios realizados com lubrificante usado, com uma carga cerca de 2 vezes maior (82,75 N) esta teve um máximo registado de temperatura de 33°C (figura 4.33).

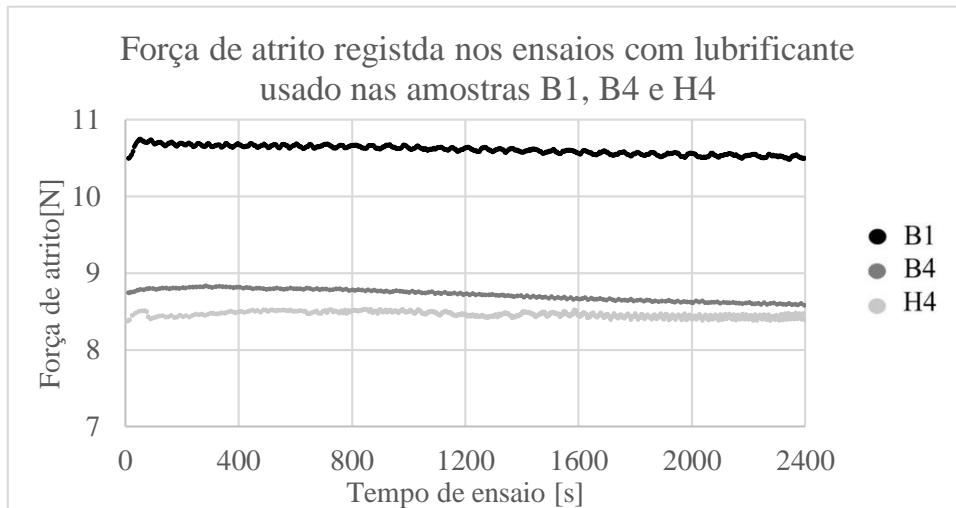


Figura 4.31 - Força de atrito registada nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4

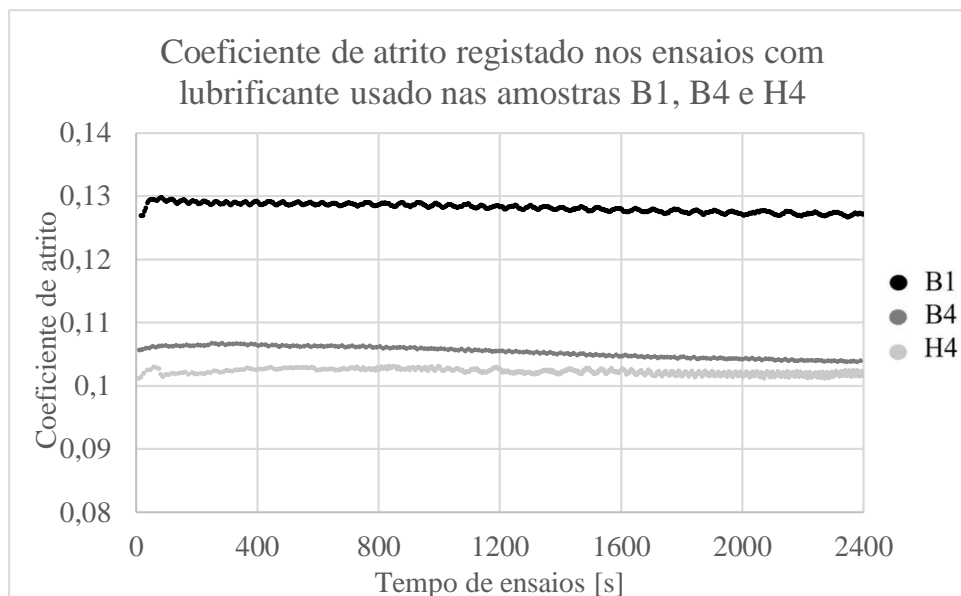


Figura 4.32 - Coeficiente de atrito registado nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4

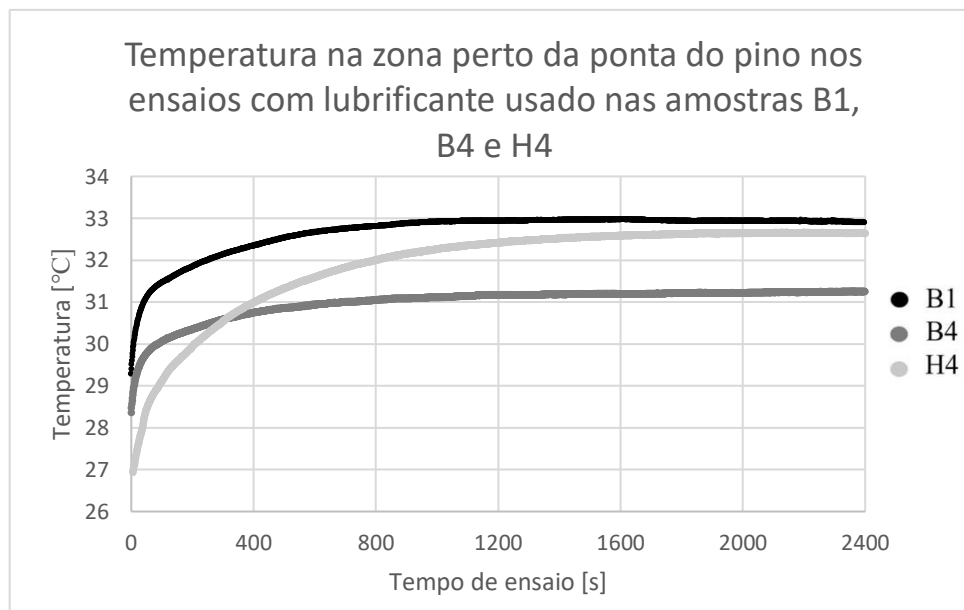


Figura 4.33 - Temperatura na zona perto da ponta do pino nos ensaios com lubrificante nas amostras B1, B4 e H4

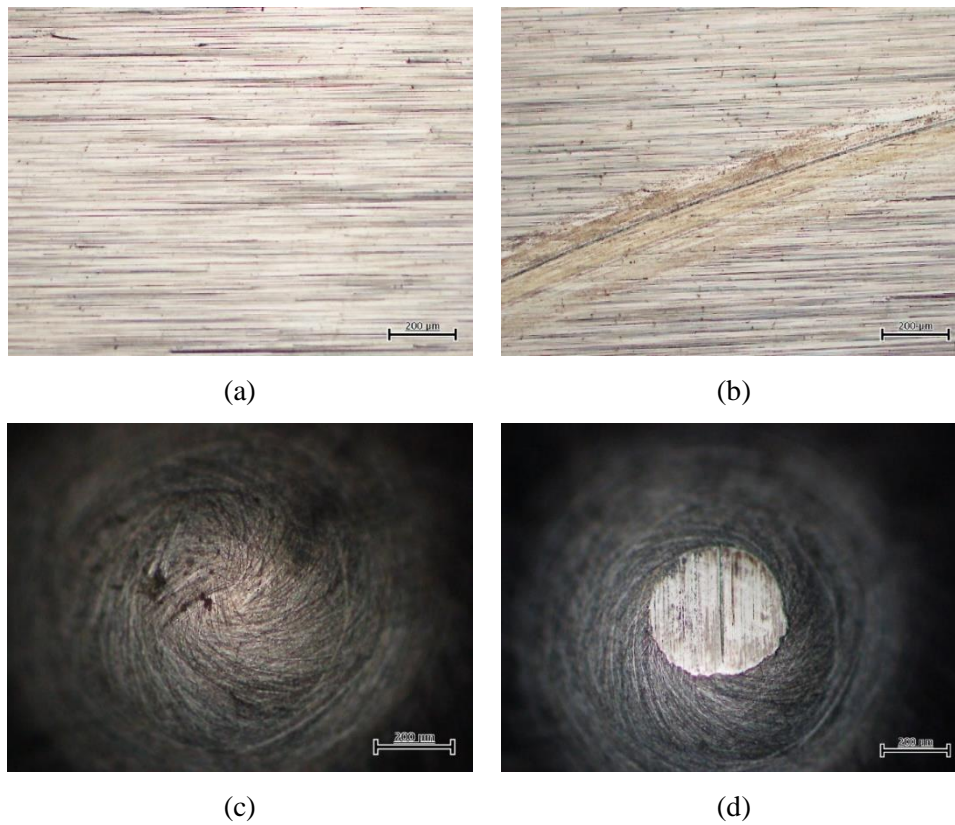


Figura 4.34 - (a) superfície da amostra B1 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra B1 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio

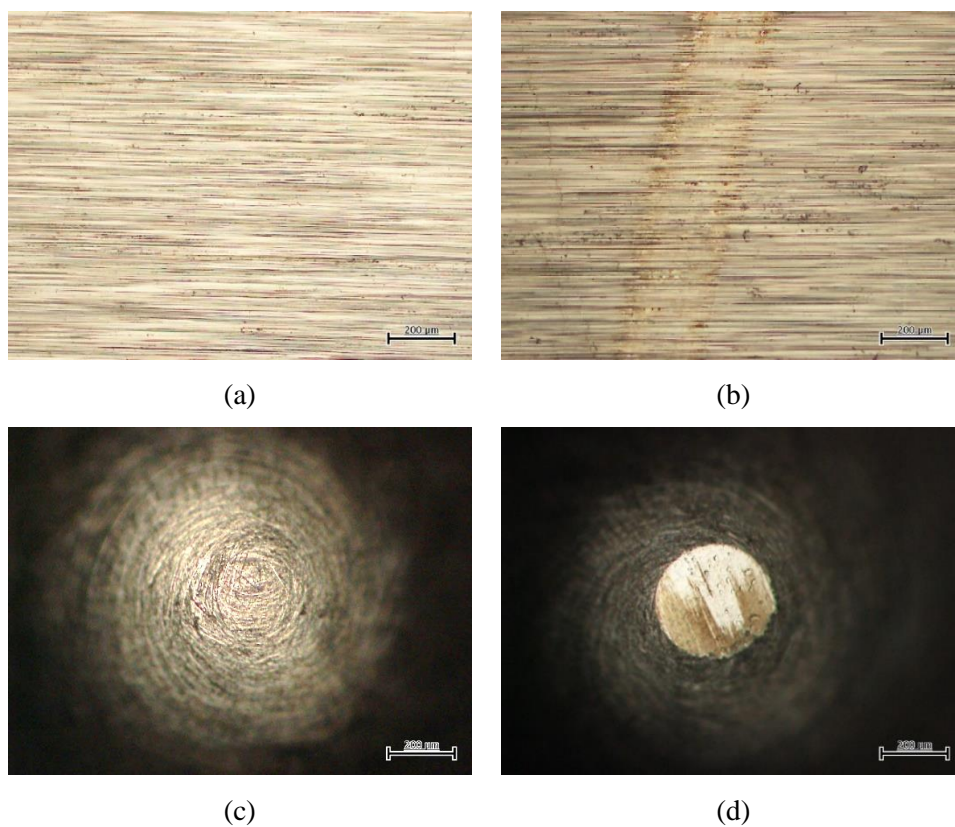


Figura 4.35 - a) superfície da amostra B4 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra B4 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio

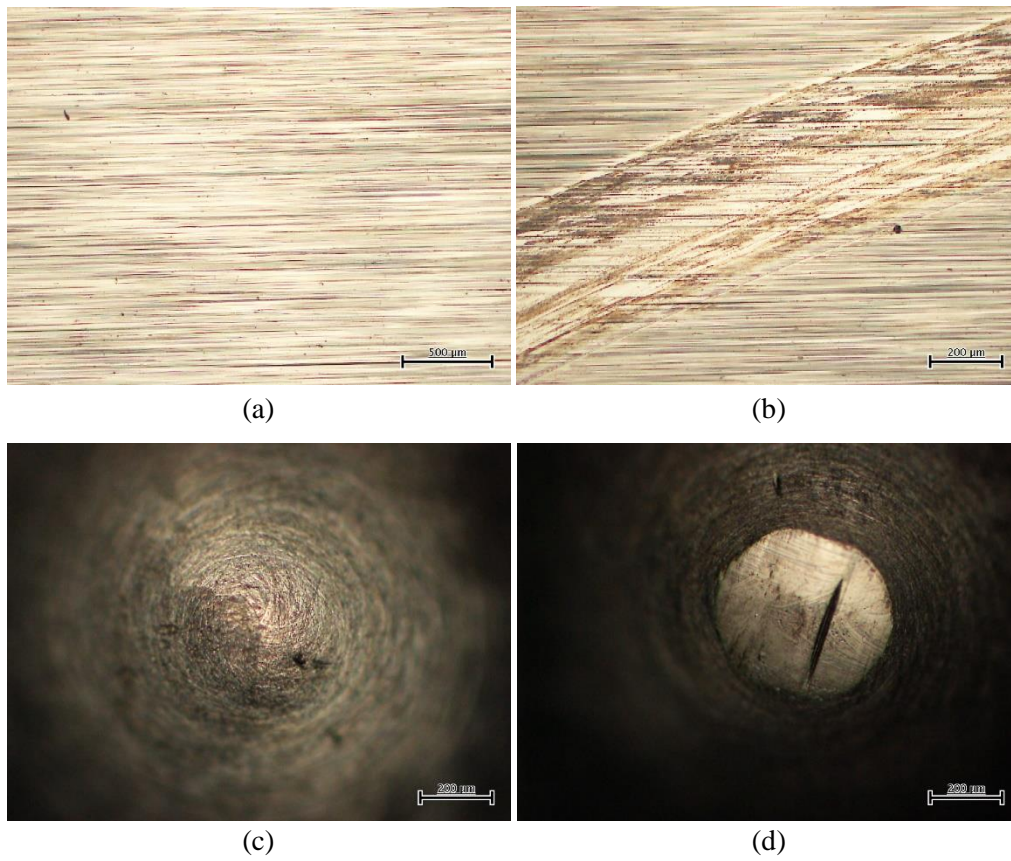


Figura 4.36 - a) superfície da amostra H4 antes da realização do ensaio; (b) pista de desgaste na superfície da amostra H4 após a realização do ensaio; (c) superfície do pino antes da realização do ensaio; (d) superfície do pino após a realização do ensaio

## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

---

Tendo em conta o que foi abordado nos vários capítulos, são destacados nos próximos pontos as principais conclusões deste trabalho:

- No corpo da roda dentada a dureza média obtida, nos ensaios de micro dureza Vickers, foi de  $294,82_{0,974}^{0,86}$  HV 0,5. Nos ensaios efetuados nos dentes A, B e C, na zona da cabeça no dente da engrenagem, os resultados obtidos foram de  $468,85 \pm 5,25$  HV 0,5,  $646,24_{15,64}^{22,66}$  HV 0,5 e  $696,95_{2,65}^{3,65}$  HV 0,5, respetivamente. As diferenças de resultados foram justificadas pela zona de onde estes foram retirados, visto que alguns dos dentes da engrenagem sofreram danos aquando da sua utilização.
- Dos 3 perfis de dureza da zona do dente, verificou-se um decréscimo da dureza à medida que a distância ao topo do dente aumenta, onde se concluiu que a influência do tratamento termoquímico de cementação está presente nos dentes E, F e H, embora a engrenagem já tenha sofrido dano.
- Sobre a análise de defeitos efetuada, foi concluído que a maioria dos defeitos presentes nas amostras estudadas têm uma área compreendida no intervalo de  $[1 \times 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ a } 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$  (cerca de 46,38% do total de defeitos observados). Foi possível também identificar zonas com mais defeitos de fabrico que outras. Concluiu-se assim, que existe falta de homogeneidade do material, intrínseca ao processo de fabrico.
- Foram obtidas duas equações que da tendência da taxa de perda de volume de material, para a amostra, a equação (10), e para o pino, equação (11), aquando do ensaio de desgaste a seco com carga aplicada de 41,14 N.

$$\Delta V_a = 0,0018 \times t + 0,0183 \quad (10)$$

$$\Delta V_p = 0,0015 \times t - 0,0024 \quad (11)$$

- No estudo da perda de volume na amostra e no pino, com as cargas aplicadas de 16,83 N, 30,84 N, 34,35 N e 41,14 N, os valores do coeficiente de atrito obtidos estiveram compreendidos entre [0,5 e 0,75], o que era espectável tendo em conta a ausência de lubrificante. Com os dados recolhidos, foram obtidas as equações (12) e (13) que relacionam, a tendência da perda de volume na amostra e no pino, respetivamente, com a força que é aplicada.

$$\Delta V_a = 0,0065 \times e^{0,1058 \times F_N} \quad (14)$$

$$\Delta V_p = 0,0028 \times e^{0,1154 \times F_N} \quad (15)$$

- Verificou-se que nos ensaios de desgaste realizados com lubrificante usado, com uma carga aplicada de 82,75 N, as perdas de volume, foram quase insignificantes, tanto para a amostra como para o pino. Concluiu-se ainda que, o valor da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino decrescem, em valores médios, cerca de 20 N, 0,6 e 11°C, comparando com ensaios realizados a seco, com metade da carga aplicada.
- De ressaltar ainda que os valores de coeficiente de atrito registados nos ensaios com lubrificante usado, para as três amostras, se encontram entre o intervalo de [0,1 e 0,4], o que indica a existência de uma lubrificação de fronteira.

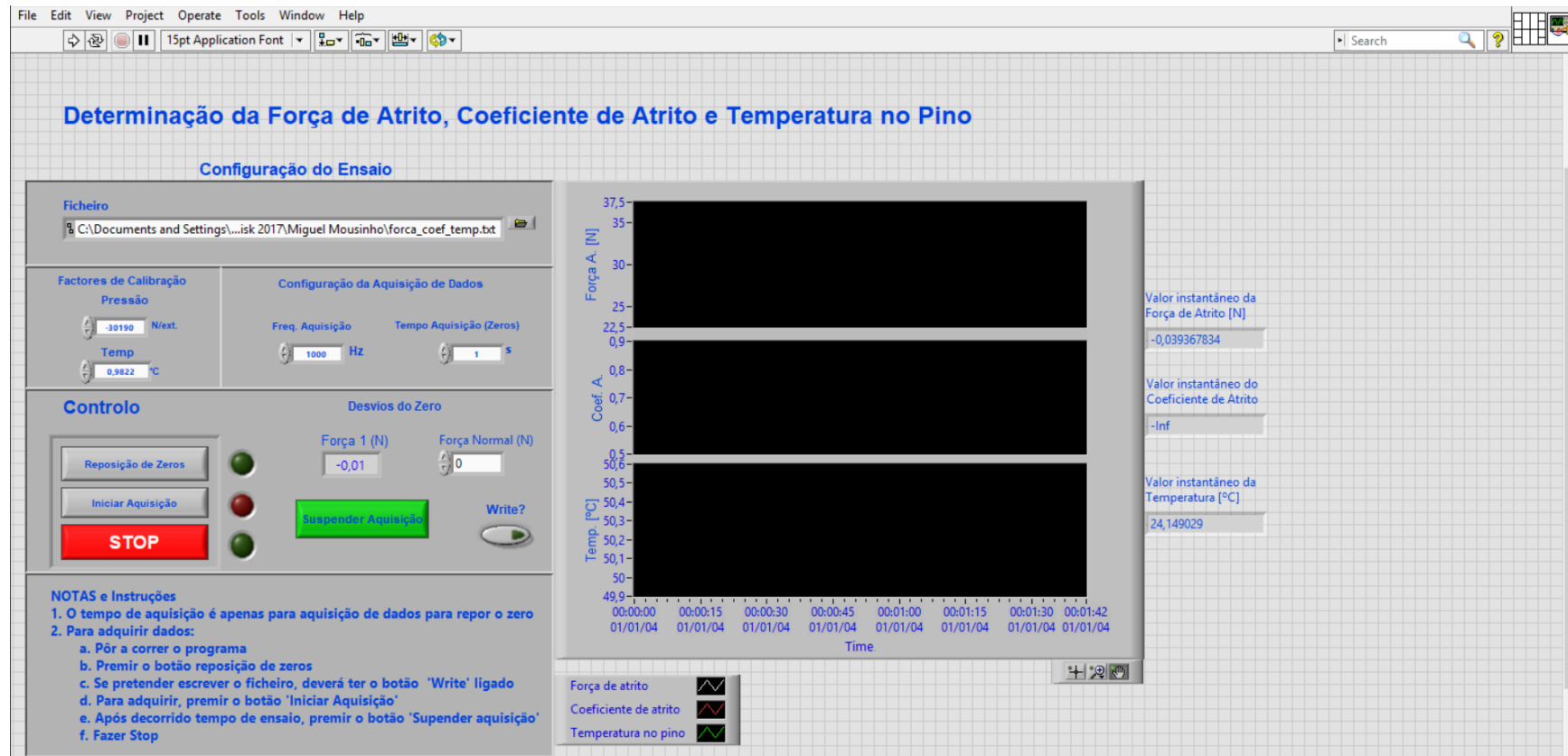
Como trabalhos futuros, é sugerido o tratamento estatístico dos dados recolhidos no ensaio de desgaste com a máquina *pin-on-disc*. O autor propõe também, tendo em conta a dureza, as áreas dos defeitos detetados e o volume perdido de material, que foi determinado nos diferentes ensaios de desgaste, estudar possíveis modelos numéricos de previsão de durabilidade das engrenagens, tendo em conta estes três parâmetros.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] A. Flodin and S. Andersson, “Simulation of Mild Wear in Spur Gears,” *Wear*, vol. 207, pp. 16–23, 1997.
- [2] S. G. G. Meneghetti, A. Terrin, “A twin disc test rig for contact fatigue characterization of gear materials,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, pp. 3185–3193, 2016.
- [3] P. R. N. Childs, “Gears,” in *Mechanical Design Engineering Handbook*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 317–366.
- [4] R. G. Budynas and N. J. Keith, *Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica*, 8th ed. McGraw Hill, 2011.
- [5] C. A. G. de M. Branco, J. A. M. Ferreira, J. D. M. da Costa, and A. da S. Ribeiro, *Projecto de Orgãos de Máquinas*, 1st ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.
- [6] I. S. Al-Tubi, H. Long, J. Zhang, and B. Shaw, “Experimental and analytical study of gear micropitting initiation and propagation under varying loading conditions,” *Wear*, vol. 328–329, pp. 8–16, 2015.
- [7] CustomPart.net, “Sand Casting Process, Defects, Design.” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [8] S. Sulaiman and A. M. . Hamouda, “Modeling of the thermal history of the sand casting process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, no. 1–3, pp. 245–250, 2001.
- [9] ASM Internacional, “Casting,” in *ASM Handbook*, 9th ed., vol. 15, ASM Internacional, 2008, p. 3470.
- [10] American Foundry Society, “Identifying Casting Defects.” [Online]. Available: <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6944>. [Accessed: 18-Sep-2017].
- [11] B. R. Höhn and K. Michaelis, “Influence of oil temperature on gear failures,” in *Tribology International*, 2004, vol. 37, no. 2, pp. 103–109.
- [12] V. Onishchenko, “Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 83, pp. 38–55, 2015.
- [13] J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces,” *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953.
- [14] J. A. Brandão, R. Martins, J. H. O. Seabra, and M. J. D. Castro, “An approach to the simulation of concurrent gear micropitting and mild wear,” *Wear*, vol. 324–325, pp. 64–73, 2015.
- [15] J. A. Brandão, P. Cerqueira, J. H. O. Seabra, and M. J. D. Castro, “Measurement of mean wear coefficient during gear tests under various operating conditions,” *Tribol. Int.*, vol. 102, pp. 61–69, 2016.
- [16] A. Flodin and S. Andersson, “Simulation of mild wear in helical gears,” *Wear*, vol. 241, no. 2, pp. 123–128, 2000.
- [17] A. Flodin and S. Andersson, “A simplified model for wear prediction in helical gears,” *Wear*, vol. 249, no. 3–4, pp. 285–292, 2001.
- [18] N. P. Suh, “The Delamination Theory Of Wear,” *Wear*, vol. 25, pp. 111–124, 1973.
- [19] M. Masjedi and M. M. Khonsari, “On the prediction of steady-state wear rate in spur gears,” *Wear*, vol. 342–343, pp. 234–243, 2015.

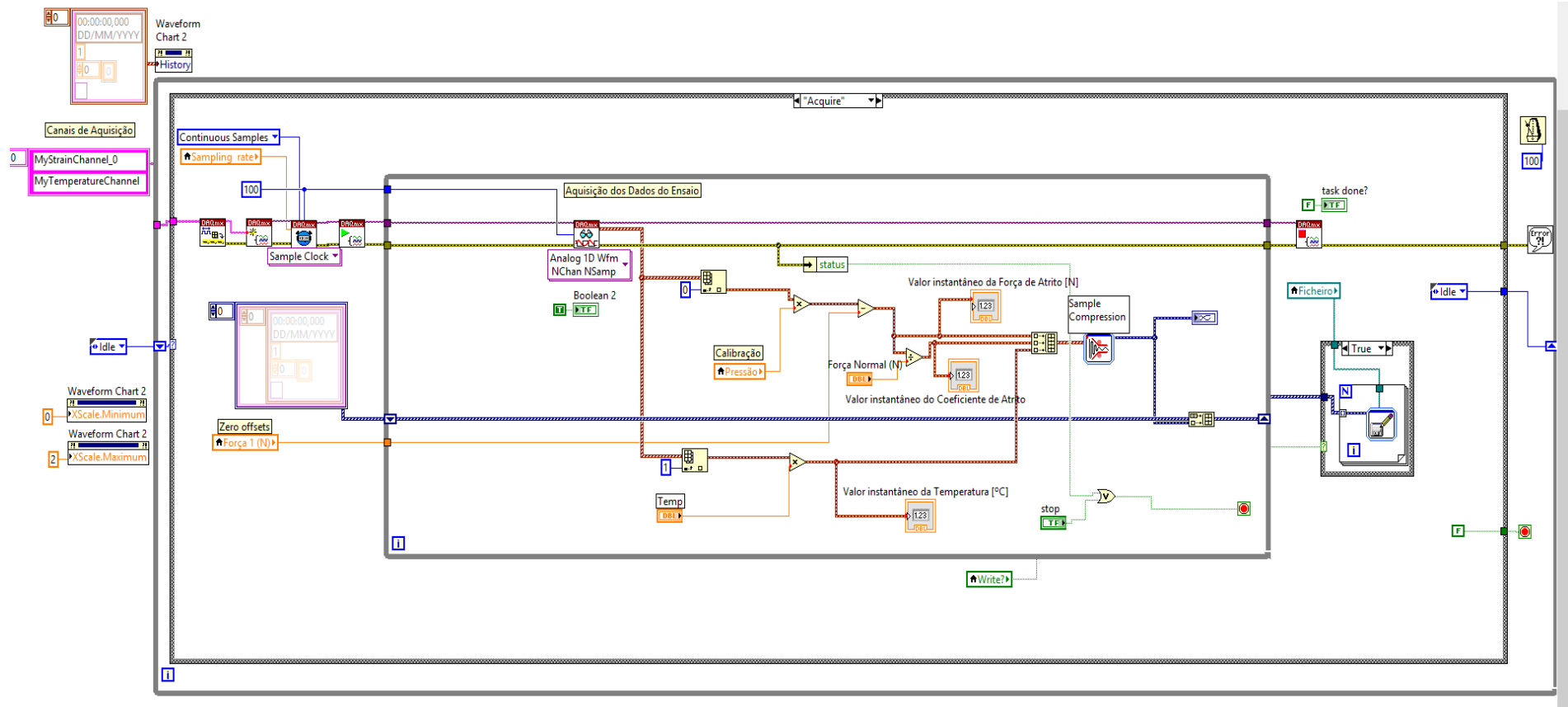
- [20] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica Vol.I - Fundamentos Teóricos*, 2nd ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010.
- [21] M. Ingram, C. Hamer, and H. Spikes, “A new scuffing test using contra-rotation,” *Wear*, vol. 328–329, pp. 229–240, 2015.
- [22] V. Moorthy and B. A. Shaw, “An observation on the initiation of micro-pitting damage in as-ground and coated gears during contact fatigue,” *Wear*, vol. 297, no. 1–2, pp. 878–884, 2013.
- [23] G. Fajdiga, S. Glodež, and J. Kramar, “Pitting formation due to surface and subsurface initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements,” *Wear*, vol. 262, no. 9–10, pp. 1217–1224, 2007.
- [24] ISO 10825, “Gears. Wear and damage to gear teeth. Terminology.” p. 61, 1995.
- [25] F. E. Kennedy, “Thermal and thermomechanical effects in dry sliding,” *Wear*, vol. 100, no. 1–3, pp. 453–476, 1984.
- [26] F. E. Kennedy, Y. Lu, and I. Baker, “Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting,” *Tribol. Int.*, vol. 82, no. PB, pp. 534–542, 2015.
- [27] DIN, “DIN EN 10084: Case hardening steels - Technical delivery conditions,” no. June 2008, p. 39, 2008.
- [28] ASM International, “Volume 9 - Metallography and Microstructures,” in *ASM Handbook*, vol. 9, ASM Internacional, 2004, p. 2733.
- [29] ASTM E384-16, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*. West Conshohocken, PA, 2016.
- [30] ASTM E3-95, *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, PA, 2016.
- [31] ASTM G99-95a, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. West Conshohocken, PA, 2000.
- [32] E. M. Bortoleto *et al.*, “Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test,” *Wear*, vol. 301, no. 1–2, pp. 19–26, 2013.
- [33] D. J. O. A. Pereira, “Friction Surfacing of Aluminium Alloys,” Master Thesis. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [34] S. Abbasi, A. Jansson, L. Olander, U. Olofsson, and U. Sellgren, “A pin-on-disc study of the rate of airborne wear particle emissions from railway braking materials,” *Wear*, vol. 284–285, pp. 18–29, 2012.
- [35] N. K. Fukumasu, G. A. A. Machado, R. M. Souza, and I. F. Machado, “Stress Analysis to Improve Pitting Resistance in Gear Teeth,” in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 45, pp. 255–258.
- [36] P. J. L. Fernandes and C. McDuling, “Surface contact fatigue failures in gears,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 4, no. 2, pp. 99–107, 1997.



Anexo A - Painel principal do software Labview usado para adquirir os dados da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura perto da ponta do pino



## 8 ANEXO B



Anexo B - Diagrama de blocos do programa em Labview para aquisição de dados da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura perto da ponta do pino



## 9 ANEXO C

---

```
sizeA=size(A);
a=(sizeA(1,1)/10);
b=floor(a);
B=zeros(b,3);

j=0;

for i=1:b
    for c=1:10
        j=j+1;
        B(i,1)=B(i,1)+A(j,2);
    end
    B(i,1)=(B(i,1)/10);
end

j=0;

for i=1:b
    for c=1:10
        j=j+1;
        B(i,2)=B(i,2)+A(j,3);
    end
    B(i,2)=(B(i,2)/10);
end

j=0;

for i=1:b
    for c=1:10
        j=j+1;
        B(i,3)=B(i,3)+A(j,4);
    end
    B(i,3)=(B(i,3)/10);
end

sizeB=size(B);

B(:,4)=B(:,3);
B(:,3)=B(:,2);
B(:,2)=B(:,1);

t=0;
for i=1:sizeB(1,1)
    B(i,1)=t;
    t=t+1;
end
save('media','B')
xlswrite('ensaioxy.xlsx',B)
```

Anexo C - Código utilizado em Matlab para tratamento de dados nos ensaios de desgaste



## 10 ANEXO D

Dados recolhidos relativos à calibração da célula de carga (Tabela 10.1) e ao termopar (Tabela 10.2).

Tabela 10.1 – Anexo D: Dados relativos à extensão recolhidos para a elaboração da reta de calibração

Força (N)	Extensão											Média
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	-3,41E-07	-4,18E-07	-4,58E-07	-4,82E-07	-4,75E-07	-5,60E-07	-5,28E-07	-5,34E-07	-5,87E-07	-5,87E-07	-6,18E-07	-5,0798E-07
5	0,000171	0,000171	0,000171	0,00017	0,000171	0,000171	0,000171	0,000171	0,00017	0,000171	0,000171	0,000171
10	0,000334	0,000336	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337	0,000337
20	0,000666	0,000666	0,000665	0,000663	0,000661	0,000661	0,00066	0,00066	0,000659	0,000659	0,000659	0,000662
30	0,00098	0,000988	0,00098	0,00099	0,00099	0,000991	0,000989	0,000989	0,000989	0,000989	0,000989	0,000988
35	0,00114	0,001166	0,001167	0,00117	0,001171	0,001172	0,001172	0,001173	0,001173	0,001174	0,001175	0,001168

Tabela 10.2 – Anexo D: Dados relativos às temperaturas do termopar e do termómetro para elaboração da reta de calibração do termopar

Tempo [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura termopar [°C]	98,88	99,18	99,08	98,77	98,59	98,34	97,74	96,61	95,8	95,42	93,8	93,27
Temperatura termómetro [°C]	99,4	99,4	99,5	99,2	98,9	98,5	98,1	97	96,2	95,6	94,5	93,6