



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Jorge Miguel Nobre Sequeira

**CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO SINTERIZADO:
INFLUÊNCIA DA FASE LIGANTE**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho e pelo Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva e apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Caracterização Tribológica de Carboneto de Tungsténio Sinterizado: Influência da Fase Ligante

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Tribological Characterization of Sintered Tungsten Carbide: Binder's Influence

Autor

Jorge Miguel Nobre Sequeira

Orientadores

Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra
Orientador	Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva Investigador da Universidade de Coimbra
Vogais	Professora Doutora Ana Maria de Oliveira e Rocha Senos Professora Associada da Universidade de Aveiro

Coimbra, Julho, 2020

Learning never exhausts the mind. The noblest pleasure is the joy of
understanding.

Leonardo Da Vinci

Agradecimentos

Esta dissertação é o pináculo de dezassete anos de trabalho e dedicação. Dezassete anos em que passo a passo delinee o caminho que queria seguir, sendo este o momento em que esse caminho desemboca na linha de meta académica, não sendo este o final da competição, mas sim da prova.

O presente trabalho apenas foi possível devido à colaboração e apoio de diversas pessoas, as quais irei sempre lembrar e agradecer, e demonstro desde já o meu reconhecimento.

Ao excelentíssimo Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho. Pela sua prontidão diária, por ter sempre uma sábia palavra orientativa e demonstrar, sempre e claramente, o caminho a percorrer. Pelo incessante apoio. Pela transmissão de conhecimentos. Pelos conselhos transmitidos.

Ao caríssimo Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva. Pela sua constante preocupação na evolução do trabalho, disponibilidade permanente e abertura. Pelo incessante apoio. Pela transmissão de conhecimentos. Pelos conselhos transmitidos.

Ao engenheiro Pedro Pereira. Pelas breves conversas elucidativas, por dúvidas esclarecidas. Pela informalidade do trato. Pela transmissão de conhecimento. Pela troca de pensamentos.

A todos aqueles com quem diariamente coabitei no laboratório de Construções Mecânicas do DEM da FCTUC.

Aos meus pais. Pela cega confiança que em mim depositaram durante todo o percurso. Pela motivação e apoio nos desaires. Pela orgulhosa parabenização nos sucessos. Pela sua constante presença e as suas fortes palavras de apoio. Pela construção de uma base sólida para atingir o sucesso. Pela harmonia e estabilidade.

Aos meus irmãos. Pelas horas de trabalho que me tentaram boicotar. Pelos momentos em que se aperceberam não eram propícios a distrações. Pela necessária calma e tranquilidade que por fim proporcionaram.

À Ana Silva. Pela confiança transmitida e depositada. Pelos desabafos permitidos. Pela estabilidade proporcionada. Pela palavra amiga e ajuda sempre que necessário. Mas também pelos muitos bons momentos proporcionados.

Aos meus amigos. Aos mais recentes e mais antigos. Não enumero nenhum pelo risco de cometer algum lapso e esquecer-me de alguém. Eles que me acompanharam ao longo do meu percurso acadêmico e pessoal, que constituem a minha segunda família. Sempre presentes: nas derrotas e vitórias; no trabalho e no lazer.

Aos meus colegas de casa. Atuais e transatos. A todos os momentos bem passados e de amena cavaqueira. Mas também aos momentos mais tensos e difíceis.

A todos aqueles anteriormente enumerados, uma enorme palavra de profundo agradecido e bem-haja. Foram preponderantes. Sem vocês não teria sido possível.

Resumo

O desgaste por deslizamento, de diversas ligas de metal duro à base de carboneto de tungstênio não são amplamente escrutinadas, nem se conhece um modelo matemático que quantifique o volume desgastado em função da severidade. Para além do referido, também não é conhecido o comportamento do coeficiente de atrito, nem como este evolui, mais uma vez, em função da severidade. Em suma, não é do conhecimento da comunidade científica e industrial a influência da variação da fase ligante no comportamento tribológico dos metais duros à base de WC. Este estudo focar-se-á no desgaste por deslizamento na ausência de matéria lubrificante.

O objetivo, da presente dissertação, é compreender o efeito da variação da constituição da fase ligante nas propriedades tribológicas dos carbonetos cementados de WC, bem como estabelecer uma relação entre estas e as propriedades mecânicas dos compósitos de WC, tais como a tenacidade à fratura e a dureza.

De modo a estudar a influência da composição da fase ligante, foram realizados ensaios tribológicos com auxílio de um tribómetro. Este equipamento, além de realizar os ensaios de desgaste pretendidos, fornece dados experimentais fulcrais para a compreensão da evolução do atrito em cada ensaio, bem como permite o cálculo do coeficiente de atrito médio correspondente. Para criar um modelo matemático que caracterize o desgaste em função da severidade, é necessário determinar o volume das pistas de desgaste. A determinação deste volume de material desgastado foi realizado com auxílio do perfilómetro *Mitutoyo SJ-500*, seguindo-se, posteriormente, tratamento dos dados gerados, com recurso a integração numérica. De seguida, foi determinada a taxa específica de desgaste, tanto para as pistas de desgaste, como para o contra corpo. Por fim, as superfícies de desgaste foram analisadas através de microscopia eletrónica de varrimento.

Através da análise dos resultados obtidos, e excluindo um certo efeito de rodagem inicial, verifica-se que o coeficiente de atrito é independente da distância de deslizamento, mas depende da carga normal aplicada no contacto. Este não apresenta qualquer correlação com o volume de material desgastado, mas a severidade desempenha um papel preponderante, uma vez que, através dos resultados obtidos é possível concluir

que, quanto maior for a severidade, maior é a profundidade das pistas de desgaste. Consequentemente, este aumento de profundidade das pistas de desgaste, desemboca num maior volume de material desgastado nas amostras.

Palavras-chave: Carboneto de Tungstênio, Tribologia, Atrito, Desgaste, Ligante, Taxa Específica de Desgaste.

Abstract

Sliding wear of various tungsten carbides is not widely scrutinized, or a mathematical model isn't known to quantify the wear volume as a function of severity. In addition to the above, the behavior of the friction coefficient is also unknown, or how it evolves, once again, according to severity. In short, the scientific and industrial community is not aware of the influence of the variation of the binding phase on the tribological behavior of WC-based hard metals. This study will focus on non-lubricated sliding wear.

The objective of this dissertation is to understand the effect of the variation of the constitution of the binder phase on the tribological properties of WC cemented carbides, as well as to establish a relationship between these and the mechanical properties of WC composites, such as fracture toughness and the hardness.

In order to study the influence of the composition of the binding phase, tribological tests were carried out with the aid of a tribometer. This equipment, in addition to performing the intended wear tests, provides key experimental data for understanding the evolution of friction in each test, as well as allowing the calculation of the corresponding average friction coefficient. To create a mathematical model that characterizes wear according to severity, it is necessary to determine the volume of the wear tracks. The determination of this volume of worn material was carried out with the aid of the Mitutoyo SJ-500 profilometer, followed subsequently by treatment of the generated data, using numerical integration. Then, the specific wear rate was determined, both for the wear tracks and for the counterbody. Finally, the wear surfaces were analyzed using scanning electron microscopy.

Through the analysis of the results obtained, and excluding a certain initial running-in effect, it appears that the friction coefficient is independent of the sliding distance, but it depends on the normal load applied to the contact. This does not present any correlation with the volume of material, but the severity plays a predominant role, since, through the results obtained it is possible to conclude that the greater the severity, the greater the depth of the wear tracks. Consequently, this increase in the depth of the wear tracks leads to a greater volume of worn material in the samples.

Keywords Tungsten Carbide, Tribology, Friction, Wear, Binder, Specific Wear Rate.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS	7
3.1. Materiais	7
3.1.1. Amostras.....	7
3.1.2. Contra Corpo	9
3.2. Equipamentos.....	11
3.2.1. Tribómetro	11
3.2.2. Perfilómetro	14
3.2.3. Microscópio Ótico	15
3.2.4. Microscópio Ótico com Máquina Fotográfica.....	16
3.2.5. Microscópio Eletrónico de Varrimento	17
3.3. Procedimentos.....	17
3.3.1. Planeamento de ensaios	17
3.3.2. Método de Montagem no Tribómetro	20
3.3.3. Procedimento Experimental	21
3.3.4. Curva e Coeficiente de Atrito.....	22
3.3.5. Variação do Coeficiente de Atrito Médio.....	25
3.3.6. Volume da Pista de Desgaste.....	25
3.3.7. Taxa Específica de Desgaste das Amostras.....	29
3.3.8. Volume Desgastado no Contra Corpo	30
3.3.9. Taxa Específica de Desgaste do Contra Corpo	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Demonstração de Resultados	31
4.1.1. Amostra C1.....	31
4.1.2. Amostra C2.....	36
4.1.3. Amostra C3.....	37
4.1.4. Amostra C4.....	39
4.1.5. Amostra C5.....	40
4.1.6. Amostra C6.....	41
4.1.7. Amostra C7.....	42
4.1.8. Comparação do Comportamento dos Ensaios	43
4.2. Discussão Global de Resultados	47
5. CONCLUSÕES	59

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA	65
APÊNDICE B – AMOSTRA C2	69
Curvas de Atrito	69
Coeficiente de Atrito Médio.....	70
Variação do Coeficiente de Atrito Médio	71
Volume das Pistas de Desgaste	71
Taxa Específica de Desgaste – Amostra	72
Volume Desgastado – Contra Corpo.....	73
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	74
APÊNDICE C – AMOSTRA C3	75
Curvas de Atrito	75
Coeficiente de Atrito Médio.....	76
Variação do Coeficiente de Atrito Médio	77
Volume das Pistas de Desgaste	77
Taxa Específica de Desgaste – Amostra	78
Volume Desgastado - Contra Corpo	79
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	80
APÊNDICE D – AMOSTRA C4	81
Curvas de Atrito	81
Coeficiente de Atrito Médio.....	83
Variação do Coeficiente de Atrito Médio	83
Volume das Pistas de Desgaste	84
Taxa Específica de Desgaste – Amostra	85
Volume Desgastado - Contra Corpo	85
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	86
APÊNDICE E – AMOSTRA C5	87
Curvas de Atrito	87
Coeficiente de Atrito Médio.....	88
Variação do Coeficiente de Atrito Médio	89
Volume das Pistas de Desgaste	90
Taxa Específica de Desgaste – Amostra	90
Volume Desgastado - Contra Corpo	91
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	92
APÊNDICE F – AMOSTRA C6.....	93
Curvas de Atrito	93
Coeficiente de Atrito Médio.....	94
Variação do Coeficiente de Atrito Médio	94
Volume das Pistas de Desgaste	95
Taxa Específica de Desgaste – Amostra	96
Volume Desgastado - Contra Corpo	96
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	97
APÊNDICE G – AMOSTRA C7	99

Curvas de Atrito.....	99
Coeficiente de Atrito Médio	100
Variação do Coeficiente de Atrito Médio.....	101
Volume das Pistas de Desgaste	101
Taxa Específica de Desgaste – Amostra.....	102
Volume Desgastado - Contra Corpo.....	102
Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Mecanismos de desgaste nos diferentes tipos de contacto retirado de Czichos [14]	3
Figura 2.2. Evolução da taxa de desgaste com o aumento da dureza em diferentes WC-Co por Fisher [17]	4
Figura 2.3. Principais produtores mundiais de Co retirado de [22].....	6
Figura 3.1. Evolução da temperatura no processo de sinterização	8
Figura 3.2. Contra corpo.....	10
Figura 3.3. Tribómetro.....	11
Figura 3.4. Fluxograma do funcionamento da interface da aquisição de dados.....	13
Figura 3.5. Interface do programa de aquisição de dados	14
Figura 3.6. Perfil transversal à pista de desgaste	15
Figura 3.7. Microscópio ótico <i>Mitutoyo Toolmaker's Microscopes</i>	15
Figura 3.8. Material desgastado e plano preferencial de deslizamento no contra corpo	16
Figura 3.9. Montagem pormenorizada dos pontos de colocação das amostras e do contra corpo.....	20
Figura 3.10. Curva de atrito construída a partir de uma ensaio tribológico	23
Figura 3.11. Curva de atrito amenizada construída a partir de um ensaio tribológico	24
Figura 3.12. Esquema da divisão geométrica da pista de desgaste para o cálculo do volume desgastado	27
Figura 3.13. Nivelamento e amenização de um perfil retirado de uma pista de desgaste ...	28
Figura 3.14. Taxa específica de desgaste de uma amostra	30
Figura 4.1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios na amostra C1	32
Figura 4.2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C1	33
Figura 4.3. Taxa específica de desgaste da amostra C1	35
Figura 4.4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC1	36
Figura 4.5. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 1 nas diferentes amostras.....	43
Figura 4.6. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 2 nas diferentes amostras.....	44
Figura 4.7. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 3 nas diferentes amostras.....	44

Figura 4.8. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 4 nas diferentes amostras.....	45
Figura 4.9. Coeficiente de Atrito Médio de cada material em estudo.....	45
Figura 4.10. Taxa específica de desgaste das diferentes amostras.....	46
Figura 4.11. Taxa específica de desgaste dos diferentes contra corpos.....	46
Figura 4.12. Gráfico da correlação entre COFm e E.....	49
Figura 4.13. Gráfico da correlação entre COFm e HV30.....	49
Figura 4.14. Gráfico da correlação entre COFm e KIC.....	50
Figura 4.15. Gráfico da correlação entre COFm e KIC/E.....	51
Figura 4.16. Gráfico da correlação entre k e E.....	52
Figura 4.17. Gráfico da correlação entre k e HV30.....	53
Figura 4.18. Gráfico da correlação entre k e KIC.....	53
Figura 4.19. Gráfico da correlação entre k e KIC/E.....	54
Figura 4.20. Correlação de Evans.....	55
Figura 4.21. Fotografias retiradas por SEM. a) Pista de desgaste; b) material depositado na periferia da pista de desgaste; c) tribofilme depositado na pista de desgaste da amostra C3; d) tribofilme depositado na pista de desgaste da amostra C6.....	57
Figura 4.22. Fotografias do contra corpo. a) Contra corpo por limpar; b) Contra corpo por limpar observado no SEM; c) Material depositado por adesão na periferia da calota desgastada do contra corpo C3; d) Material depositado por adesão na periferia da calota desgastada do contra corpo C6.....	58
Figura AA. 1. Calibração das células de carga.....	67
Figura AB. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C2.....	70
Figura AB. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C2.....	70
Figura AB. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C2.....	72
Figura AB. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC2.....	74
Figura AC. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C3.....	76
Figura AC. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C3.....	76
Figura AC. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C3.....	78
Figura AC. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC3.....	80
Figura AD. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C4.....	82
Figura AD. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C4.....	83

Figura AD. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C4.....	85
Figura AD. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC4	86
Figura AE. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C5	88
Figura AE. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C5	88
Figura AE. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C5	90
Figura AE. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC5.....	92
Figura AF. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C6	93
Figura AF. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C6	94
Figura AF. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C6	96
Figura AF. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC6.....	97
Figura AG. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C7....	100
Figura AG. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C7	100
Figura AG. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C7.....	102
Figura AG. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC7	103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Denominação e composição das amostras.....	8
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas das amostras	9
Tabela 3.3. Condições de ensaios	18
Tabela 3.4. Contacto Hertziano	19
Tabela 4.1 Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C1	32
Tabela 4.2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C1	34
Tabela 4.3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C1	34
Tabela 4.4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio no contra corpo CC1.....	35
Tabela 4.5. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C2 e do contra corpo CC2.....	37
Tabela 4.6. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C3 e do contra corpo CC3.....	38
Tabela 4.7. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C4 e do contra corpo CC4.....	39
Tabela 4.8. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C5 e do contra corpo CC5.....	40
Tabela 4.9. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C6 e do contra corpo CC6.....	41
Tabela 4.10. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C7 e do contra corpo CC7.....	42
Tabela AA. 1. Solicitação e resposta das células de carga na calibração.....	66
Tabela AB. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C2	69
Tabela AB. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C2	71
Tabela AB. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C2	72
Tabela AB. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC2.....	73
Tabela AC. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C3	75
Tabela AC. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C3	77
Tabela AC. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C3	78
Tabela AC. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC3.....	79

Tabela AD. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C4.....	81
Tabela AD. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C4	84
Tabela AD. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C4	84
Tabela AD. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC4	85
Tabela AE. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C5	87
Tabela AE. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C5	89
Tabela AE. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C5	90
Tabela AE. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC5	91
Tabela AF. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C6	93
Tabela AF. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C6.....	95
Tabela AF. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C6	95
Tabela AF. 4. Volume desgastado do contra corpo CC6	97
Tabela AG. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C7.....	99
Tabela AG. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C7	101
Tabela AG. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade na amostra C7.....	101
Tabela AG. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade do contra corpo CC7 ..	103

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_i – Área de cada trapézio

C_i – Amostra i

COF – Coeficiente de atrito

COF_{inst} – Coeficiente de atrito instantâneo

COF_m – Coeficiente de atrito médio

$dV_{calote,i}$ – Volume de cada trapézio

ΔCOF – Variação do coeficiente de atrito médio

ΔF_N – Variação da força normal

ΔF_T – Variação da força transversal

ΔM_{1i} – Variação dos momentos

E – Módulo de Elasticidade

F_a – Força de atrito

F_N – Força normal

F_T – Força transversal

H – Profundidade do desgaste

h - Altura da calota desgastada

K – Coeficiente de desgaste

k – Taxa específica de desgaste

k_C – Taxa específica de desgaste da amostra

k_{CC} – Taxa específica de desgaste do contra corpo

k' – Taxa de desgaste

l – Comprimento do corpo da pista de desgaste

N – Carga normal

$n_{COF_{inst}}$ – Número de parcelas de coeficiente de atrito instantâneo

P – Pressão

R – Raio do contra corpo

R_{contacto} – Raio da área de contacto hertziano

r – Raio da calota desgastada

r_i – Distância do trapézio ao centro de gravidade

τ – Tensão de corte

μ – Coeficiente de atrito

θ – Ângulo de rotação

V – Volume

$V_{\text{calote } i}$ – Volume da calota i

V_{corpo} – Volume do corpo da pista de desgaste

V_{CC} – Volume do contra corpo

V_{PD} – Volume da pista de desgaste

$V_{\text{pista desgaste}}$ – Volume da pista de desgaste

ν – Coeficiente de Poisson

w_E – Taxa de correlação de Evans

x – Distância de deslizamento

x_{CG} – Localização do centro de gravidade da pista de desgaste

x_i – Altura do trapézio

y_i – Profundidade da pista de desgaste

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DURIT – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda

E – *i* – Ensaio *i*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HV30 – Dureza de Vickers

IARC – International Agency for Research on Cancer

K_{IC} – Tenacidade à fratura

Magn – Magnificação

SEM – Scanning Electron Microscope

WC – Carboneto de Tungsténio

% pond – percentagem ponderal

% vol – percentagem um volume

1. INTRODUÇÃO

O interesse pela temática do presente estudo, prende-se pelo facto de existirem muito poucos estudos sobre o desgaste por deslizamento de diversas ligas de metal duro à base de carboneto de tungsténio em função da variação do ligante, nem um modelo que quantifique o volume desgastado em função da carga aplicada e da distância de deslizamento – severidade. Para além do referido, também não é conhecido o comportamento do coeficiente de atrito, nem como este evolui, mais uma vez, em função da severidade. Em suma, não é do conhecimento da comunidade científica e industrial, de uma forma generalizada, qual a influência da variação da composição da fase ligante no comportamento tribológico dos metais duros à base de WC.

Após o reconhecimento da importância desta temática, diversas técnicas de realização de ensaios, que incluem diferentes tipos de deslizamento e contacto, constituem estudos realizados com recurso a ligas à base de WC com diferentes ligantes.

Embora já existam diversos estudos com recurso ao ensaio de *ball-cratering*, na área de desgaste por deslizamento, não é conhecido qualquer trabalho no âmbito de investigação realizado nem conhecimento científico publicado, que avalie o coeficiente de atrito nem a taxa específica de desgaste, em carbonetos cementados de tungsténico com diferentes ligantes.

Sendo um trabalho pioneiro em desgaste por deslizamento, tal como referido anteriormente, muito trabalho é possível realizar e muitos são os caminhos a seguir. Contudo, a presente dissertação focar-se-á no desgaste por deslizamento na ausência de matéria lubrificante.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os metais duros à base de WC são amplamente conhecidos pela sua dureza, boa tenacidade, resistência ao desgaste e corrosão [1–4].

Perceber e adquirir conhecimento relativo do comportamento ao desgaste de metais duros, à base de WC, é fundamental para a sua aplicabilidade. Existe um longo histórico de pesquisa e investigação acerca do comportamento ao desgaste destas ligas [5–10].

Os metais duros à base de WC são amplamente utilizados em diversas aplicações das mais variadas áreas, onde a resistência ao desgaste é preponderante. Exemplos dessas áreas são a indústria extratora mineira e mineralógica, indústria da prospeção do petróleo, bem como de ferramentas de conformação e corte [11–13].

A mais comum aparição de metal duro à base de WC, consiste numa grande fração volúmica de partículas de WC, de estrutura hexagonal, muito duro mas frágil, embebido por uma matriz ligante de Co. A excelente resistência ao desgaste dos carbonetos cementados deve-se à combinação da dureza do carboneto - o tungsténio, neste caso - com a ductilidade do ligante – o cobalto.

Os ensaios de desgaste por deslizamento, sem lubrificação, promovem o desenvolvimento de desgaste através de vários mecanismos diferentes. Na Figura 2.1 é possível conhecer quais os mecanismos de desgaste de diversos tipos de ensaio.

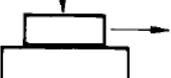
Interacting elements	Type of relative motion	Wear mechanisms			
		mainly stress interactions	stress + material interactions		
		surface fatigue	abrasion	adhesion	tribo-chemical
solid/solid (metals,	 sliding	sliding wear			

Figura 2.1. Mecanismos de desgaste nos diferentes tipos de contacto retirado de Czichos [14]

Segundo Czichos [14], neste tipo de ensaios, os mecanismos de desgaste são quatro: fadiga superficial, abrasão e adesão, bem como triboquímico.

O desgaste triboquímico deve-se à formação de tribocamadas de material desgastado oxidado que se deposita entre as duas superfícies em contacto. Estas tribocamadas não existem no momento inicial da realização de ensaios de desgaste por deslizamento, pelo que o desgaste dá-se apenas a dois corpos. No entanto, a partir do momento em que o ensaio se inicia, inicia-se também o processo de desgaste e remoção de material, tanto da amostra como do contra corpo. Este material desgastado não é removido do contacto, formando assim um filme fino de material livre que funciona como uma solução abrasiva, que toma o nome de tribocamada ou tribofilme, surgindo assim desgaste triboquímico.

No entanto, Pirso et al. [15] realizou alguns ensaios tribológicos de deslizamento em carbonetos cementados com fase ligante de cobalto. Este verificou que, durante o estágio inicial do ensaio, não existia material desgastado e que os grãos de WC eram apenas polidos.

Engqvist et al. [16] observou a formação de um tribofilme nos carbonetos cementados sujeitos a desgaste por deslizamento não lubrificado. Esse tribofilme apresentava propriedades distintas do material que lhe deu origem e esse fenómeno deve-se à acumulação de detritos, resultantes do desgaste, num aglomerado de partículas. Desta forma, o tribofilme pode influenciar o comportamento ao desgaste por deslizamento.

Jia e Fischer [17] também realizaram ensaios de desgaste por deslizamento em metais duros de WC-Co e descobriram que a taxa de desgaste aumenta com a diminuição da dureza dos carbonetos cementados, tal como demonstra a Figura 2.2.

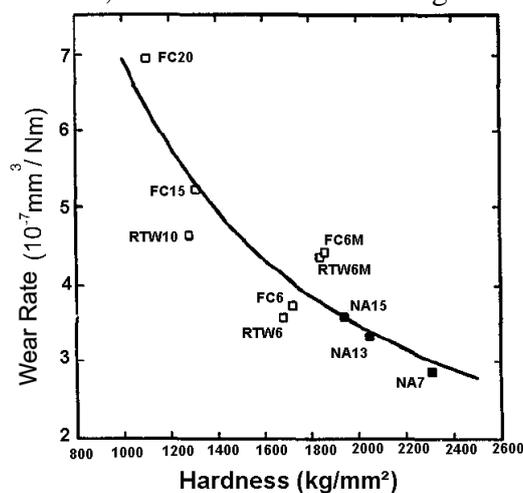


Figura 2.2. Evolução da taxa de desgaste com o aumento da dureza em diferentes WC-Co por Fisher [17]

Os carbonetos cementados de tungsténio com matriz ligante de cobalto estão, desde o ano de 2006, incluídos no grupo 2A da classificação de materiais carcinogénicos para o ser humano da IARC, classificando o WC-Co como sendo provavelmente carcinogénico para humanos. Já o Co, no mesmo ano, foi inserido no grupo 2B da mesma classificação da IARC, como sendo possivelmente carcinogénico [18]. Posteriormente, o cobalto foi identificado como um risco para o ambiente e para a saúde humana, não sendo apenas provavelmente carcinogénico, mas atribuindo-se-lhe propriedades toxicológicas e mutantes, estando atualmente em processo de reclassificação. Recentemente, o Co foi classificado como carcinogénico do grupo 1 da IARC, sendo o limiar de carcinogénese com concentração de, temporariamente, 0,1% em todos os materiais que o incluam na sua constituição. A tendência futura é a que, brevemente, o uso de cobalto na fase ligante seja nulo nos carbonetos cementados de WC [19].

Derivado ao facto de o WC não figurar em qualquer grupo da classificação de materiais carcinogénicos para o ser humano da IARC, nem de outra autoridade de saúde, os carbonetos de tungsténio estudados na presente dissertação, possuem constituições químicas da fase ligante alternativas, com vista à redução do teor de cobalto no ligante, ou até mesmo a sua supressão total. E, assim, promover a transição para metais duros de WC que não coloquem o ambiente nem a saúde humana em risco.

Para além de ser nocivo para a saúde, o cobalto também é alvo de uma intensa procura no mercado, sendo usado como material constituinte do cátodo das células de armazenamento de energia de diversos equipamentos como dispositivos eletrónicos, sendo esta a sua principal aplicação, mas também é usado na metalurgia, onde se incluem superligas e o metal duro [20]. Com o crescente aumento de equipamentos eletrónicos e de mobilidade elétrica dependentes de células de armazenamento de energia para o seu funcionamento, a procura por cobalto tem vindo a aumentar nos últimos anos, levando também a um aumento do seu custo [21].

De referir também que o principal produtor mundial de minério de cobalto é a República Democrática do Congo, que, devido às suas políticas internas e localização geográfica, dificultam trocas comerciais. Na Figura 2.3 é possível vislumbrar os principais produtores mundiais de Co [22].

Raw materials	Main global producers (average 2010-2014)	Main importers to the EU (average 2010-2014)	Sources of EU supply (average 2010-2014)	Import reliance rate*	Substitution indexes EI/SR**	End-of-life recycling input rate***
Cobalt	Democratic Republic of Congo (64%) China (5%) Canada (5%)	Russia (91%) Democratic Republic of Congo (7%)	Finland (66%) Russia (31%)	32%	1.0 / 1.0	0%

Figura 2.3. Principais produtores mundiais de Co retirado de [22]

Em suma, o objetivo deste estudo é compreender de que modo a variação da composição do ligante influencia a propriedades tribológicas dos novos carbonetos de tungstênio. Ou seja, averiguar o efeito da variação da constituição do ligante no coeficiente de atrito e estabelecer uma relação entre o desgaste e a severidade, estabelecendo sempre a ponte com as principais propriedades mecânicas desses novos compósitos de WC, tais como a tenacidade à fratura e a dureza.

De modo a estabelecer a referida ligação entre as propriedades tribológicas, resultantes dos ensaios tribológicos, e as propriedades mecânicas dos materiais, Evans [23] desenvolveu a expressão matemática que relaciona essas mesmas propriedades dos materiais a testar, equação (2.1). No entanto, esta expressão apenas se aplica a materiais cerâmicos, mas, devido às propriedades mecânicas intrínsecas dos metais duros à base de WC, esta é passível de ser usada nos mesmos, devido ao facto dos carbonetos de tungstênio serem materiais cerâmicos.

$$\frac{V}{x} = F_N^{\frac{9}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \tag{2.1}$$

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo, são abordados temas como materiais, equipamentos e procedimentos, estando estes divididos em três subcapítulos.

O subcapítulo dos materiais apresenta uma abordagem aos materiais utilizados no presente estudo, tanto do contra corpo, bem como do material base que constitui cada uma das diferentes amostras em estudo.

No subcapítulo seguinte, são enumerados e descritos todos os equipamentos que foram utilizados na realização dos ensaios tribológicos, no tratamento dos mesmos e na análise de dados e resultados.

Por fim, no terceiro e último subcapítulo, é explicitado o planeamento, bem como a metodologia adotada e aplicada, na realização dos ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento.

3.1. Materiais

3.1.1. Amostras

As amostras para este estudo são fornecidas por uma empresa de referência no mercado nacional do metal duro, a DURIT – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda. Dimensionalmente, as amostras em estudo são iguais entre si, apresentando forma cilíndrica de 20 milímetros de diâmetro e possuem diferentes alturas, que variam entre 9 e 20 milímetros.

Esta empresa, produz as referidas amostras por sinterização, através de pulverometalurgia. O processo inicia-se com a mistura dos pós, das diferentes espécies químicas, nas quantidades pretendidas. De seguida, os pós são misturados até se obter uma mistura perfeitamente homogeneizada e, posteriormente atomizados ou granulados de modo a que estes adquiram geometria esférica. É adicionado um lubrificante à mistura, sendo usada a parafina, de modo a permitir a aglomeração dos pós e a fornecer consistência necessária à manipulação da mesma. O próximo passo é a criação da peça pretendida “em verde”. Para isso, a mistura é inserida num molde, neste caso, e devido à geometria simples das amostras

– forma cilíndrica – numa prensa uniaxial. Nela, a mistura é compactada uniaxialmente a frio, reduzindo a porosidade e conferindo a geometria final pretendida. A peça “em verde” é retirada do equipamento e segue, por fim, para o processo de sinterização, no qual ocorre, gradualmente, um aumento de temperatura, cuja evolução é possível observar na Figura 3.1. O processo de sinterização permite eliminar a parafina da peça final, ocorrendo assim a ligação entre materiais, com compacidade próxima de 100%.

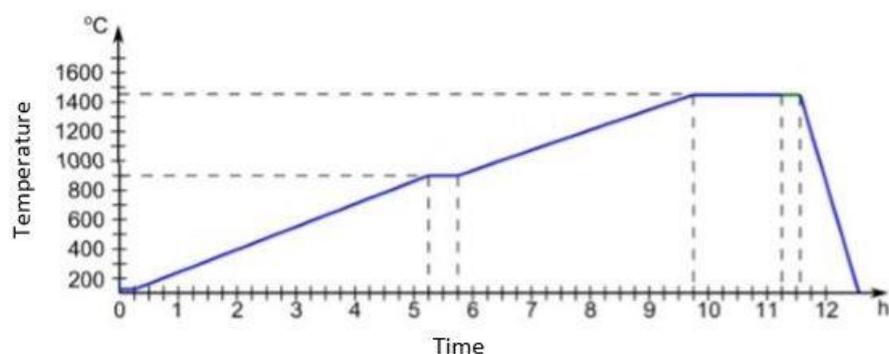


Figura 3.1. Evolução da temperatura no processo de sinterização

As amostras são constituídas por diversos materiais, formando ao todo sete composições bem distintas entre si. Os provetes são sempre, maioritariamente, compostos por WC, sendo que o que distingue estas sete amostras é a constituição do ligante, culminando nas composições explicitadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Denominação e composição das amostras

Amostra	Denominação	Composição em % pond				
		WC	Co	Ni	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C
C1	WC-Co	92,0	8,0	-	-	-
C2	WC-Ni	92,0	-	8,0	-	-
C3	WC-CoNi	92,0	5,5	2,5	-	-
C4	WC-CoCr	92,0	7,2	-	0,8	-
C5	WC-NiCr	91,2	-	8,0	0,8	-
C6	WC-CoNiCr	90,6	3,5	1,5	0,8	-
C7	WC-NiCrMo	94,2	-	8,0	0,8	0,6

Uma vez que as amostras apresentam diferenças significativas na composição do ligante, é de esperar que as propriedades mecânicas de cada amostra sejam distintas entre si. Posto isto, algumas propriedades mecânicas de todas as amostras estão explicitadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Propriedades mecânicas das amostras

Amostra	E ¹ (GPa)	ν	HV30 ² (kgf/mm ²)	K _{IC} ³ (MPa·√m)
C1	512	0,24	1659±16,3	9,9±0,13
C2	522	0,24	1508±16,3	9,4±0,29
C3	520	0,24	1604±21,6	9,5±0,17
C4	526	0,24	1825±5,7	9,3±0,17
C5	484	0,24	1664±7,5	9,5±0,13
C6	560	0,24	1920±17,7	8,8±0,08
C7	519	0,24	1616±11,2	9,0±0,32

De modo a estudar o desgaste provocado pelos ensaios nas amostras, é necessário que estas apresentem, numa das faces, uma superfície perfeitamente polida e nivelada, com um excelente acabamento superficial, de modo a reduzir o erro nas medições e cálculos a realizar. Este referido acabamento superficial é realizado pela mesma empresa que produz e fornece as amostras, recorrendo à utilização de pasta diamantada, com granulometria de 6 µm, garantido, assim, que o polimento também é normalizado, ou seja, é igual em todas as amostras.

3.1.2. Contra Corpo

O contra corpo selecionado para a realização dos ensaios de desgaste apresenta forma esférica, com 10 milímetros de diâmetro e com composição semelhantes à amostra C1, embora seja proveniente de um outro fornecedor – LUIS APARICIO, SL. O contra corpo utilizado é apresentado na Figura 3.2.

¹ O modulo de elasticidade foi determinado no DEM por técnicas de vibração

² A dureza foi determinada pela DURIT com recurso ao ensaio de dureza Vickers

³ A tenacidade à fratura foi determinada pela DURIT pelo método de Palmqvist



Figura 3.2. Contra corpo

Relativamente à composição do contra corpo, este é constituído por WC-10Co uma vez que, de modo a ser possível produzir desgaste mensurável em materiais tão duros quanto os sete que constituem as amostras, o contra corpo tem que apresentar, também, propriedades mecânicas semelhantes às dos materiais em estudo, visto que se pretende estudar o desgaste nas amostras e não o inverso. Logo, nada melhor do que um contra corpo constituído, igualmente, por metal duro.

Quanto ao acabamento superficial, este também é efetuado pelo fabricante das antagonistas, apresentando-se como sendo, também, um bom polimento superficial de toda a superfície esférica, bem como normalizado.

A escolha de um contra corpo de geometria esférica, prende-se com o facto de a geometria em questão permitir produzir pressões do contacto muito elevadas, com recurso a cargas relativamente diminutas, simulando em laboratório as pressões experimentadas por equipamentos em funcionamento em ambientes reais como bombas, ferramentas de conformação, válvulas, entre outras aplicações, sendo que estas chegam a alcançar, e até a superar, a unidade do GPa. Esta geometria de contra corpo não promove e dificulta o surgimento de problemas de desalinhamento entre as superfícies em contacto.

3.2. Equipamentos

3.2.1. Tribómetro

O tribómetro é usado para realização dos ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento. Este foi projetado e construído no DEM, tendo por base um torno mecânico e adaptado ao efeito pretendido. Na Figura 3.3 é possível observar o *setup* do referido tribómetro.



Figura 3.3. Tribómetro

A montagem exemplificada na figura anterior, por si só, não cumpre com o que é pretendido no ensaio, uma vez que é necessário monitorizar o que ocorre durante o período de tempo de realização de cada um. Para isso, as células de carga, normal e transversal, acopladas à estrutura do tribómetro, efetuam a leitura da carga instantânea aplicada nas direções normal e transversal à amostra e encontram-se conectadas a um computador. No referido computador, foi construída e programada uma interface em *LabView 8*, que permite controlar o funcionamento do tribómetro e inserir as variáveis que o utilizador pode controlar, sendo elas o tempo de duração de cada ensaio, em segundos, e a velocidade angular do veio do tribómetro, expressa sob a forma de velocidade angular, em rotações por minuto. A carga aplicada, normal às amostras, é aplicada manualmente e de forma mecânica, extra software. Tendo como expoente máximo do seu funcionamento, a realização, em intervalos de tempo definidos, da tomada de medições das forças instantâneas, normal e transversal, verificadas durante a realização dos ensaios tribológicos.

O intervalo de tempo de aquisição de dados é determinado no programa informático pela frequência de aquisição de dados definida na programação, fixada em 1 kHz, ou seja, o programa informático obtém 1000 medições do par de forças por segundo. No entanto, devido à frequência de rotação do veio do tribómetro – que é igual à frequência

de deslizamento do contra corpo – o número de medições por ciclo é dada pelo quociente entre a frequência de aquisição de leituras e a frequência de deslizamento do contra corpo.

Com os dados provenientes das duas células de carga, ou seja, com o par de forças anteriormente enumerado, o software procede ao cálculo do coeficiente de atrito instantâneo e constrói um gráfico de coeficiente de atrito em função do tempo, demonstrando como este evolui com o decorrer de cada ensaio tribológico, atualizando o mesmo gráfico com uma frequência de 1 Hz. Mas, há uma questão que se levanta: o software faz a aquisição de leituras do referido par de forças com frequência de 1 kHz e apenas atualiza o gráfico do coeficiente de atrito com uma frequência de 1 Hz?

Antes de atualizar o gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo, o programa executa um cálculo prévio: a média de ambas as forças. Com a informação obtida relativa à força transversal, devido ao facto de se tratar de movimento alternativo, a força assume dois sentidos: positivo e negativo. Por isso mesmo, o software executa o cálculo da média RMS das 1000 medições anteriormente efetuadas e guarda esse valor. Quanto à força normal, esta não verifica mudança de sinal, sendo sempre positiva. Visto isto, o software apenas efetua o cálculo da média aritmética das 1000 leituras efetuadas, guardando também este valor. De seguida, é calculado o coeficiente de atrito com base nas duas médias das forças normais e transversais relativas ao último segundo. Este pode ser designado como o coeficiente de atrito instantâneo.

Na Figura 3.4 encontra-se esquematizado, sob a forma de fluxograma, o funcionamento da interface de aquisição de dados.

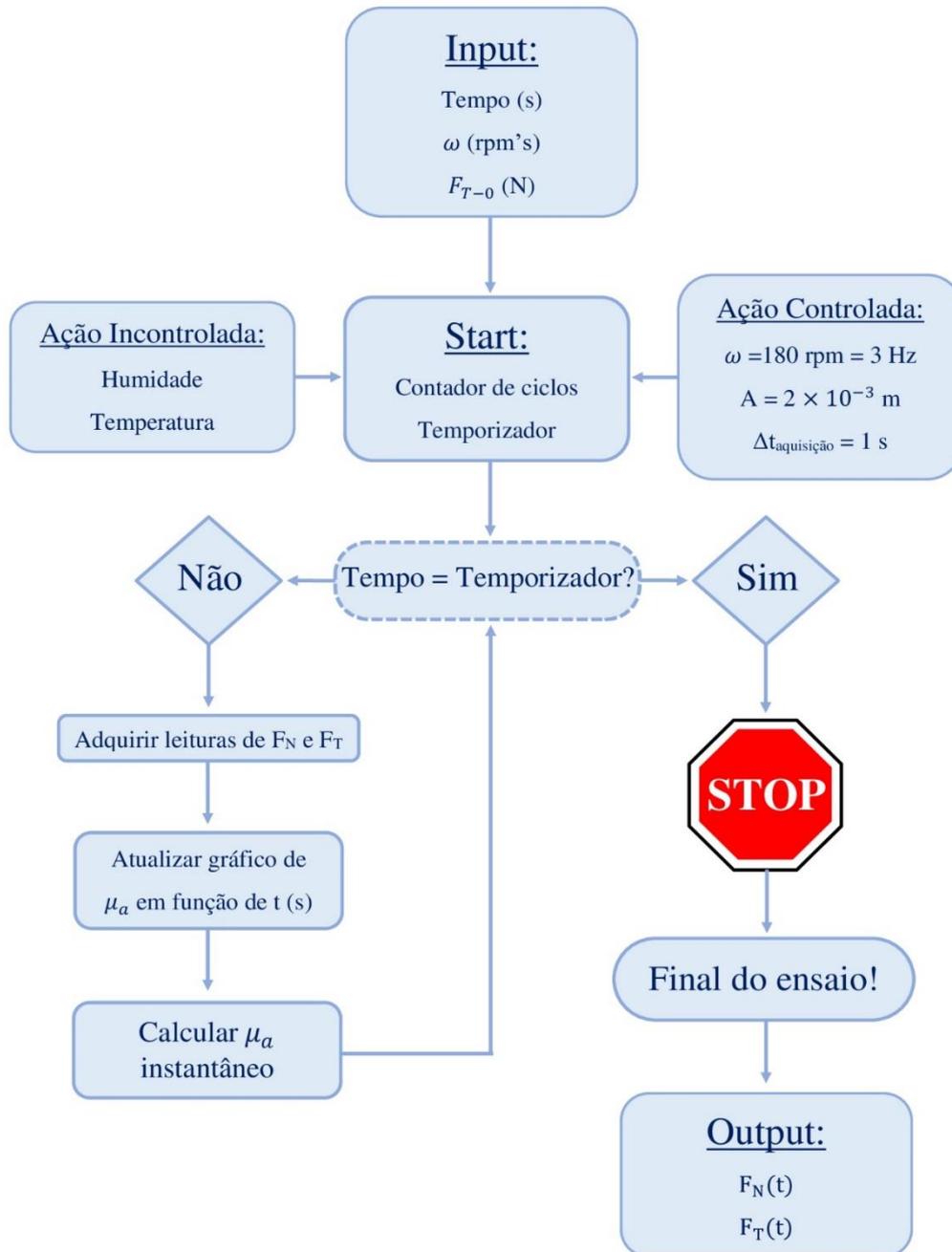


Figura 3.4. Fluxograma do funcionamento da interface da aquisição de dados

Uma vez que se trata de desgaste por deslizamento, o contra corpo desliza sobre a amostra, pelo que é necessário transformar o movimento rotativo do veio do tribómetro em movimento alternativo, de modo a que ocorra deslizamento entre as superfícies em contacto.

Devido à geometria das duas superfícies em contacto, este é do tipo esfera – plano, sendo a esfera o contra corpo e a amostra o plano. A esfera é o elemento do contacto que apresenta movimento, pelo que está fisicamente conectada ao veio móvel do tribómetro. Por outro lado, a amostra encontra-se estática e fixa a um suporte.

Tal como é possível observar no fluxograma da figura 3.4, as ações controladas são a frequência do contra corpo, de 3 Hz, o que corresponde a uma velocidade de rotação do veio do tribómetro de 180 rpm e amplitude do movimento do contra corpo é de 2 milímetros. No entanto, também há ações incontroladas no estudo, sendo elas a humidade relativa e a temperatura do ar.

Inicialmente, com o tribómetro desligado, a força transversal é nula, uma vez que esta é gerada pelo movimento relativo das faces em contacto. Posto isto, o deslizamento das faces em contacto ocorre segundo uma direção de deslizamento e desgaste preferencial.

Embora o tribómetro tenha sido construído no DEM, este cumpre com todos os requisitos e restrições, cumprindo e funcionando de acordo com a norma ASTM G133 – 95 [24].

Na Figura 3.5 é possível vislumbrar a referida interface de aquisição de dados do tribómetro.

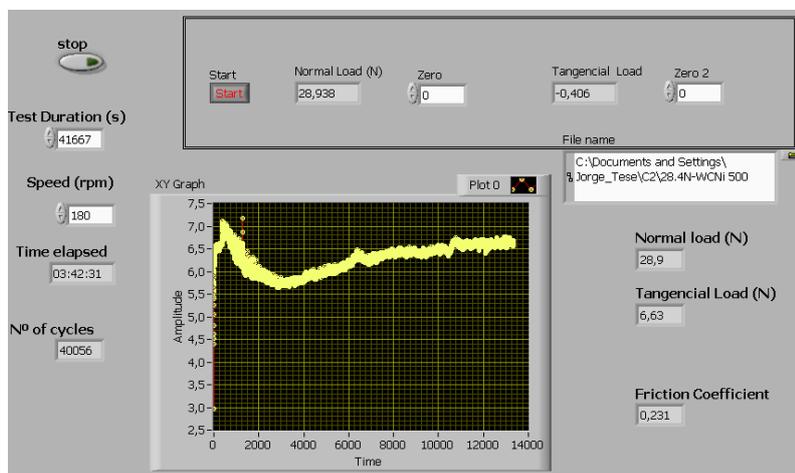


Figura 3.5. Interface do programa de aquisição de dados

3.2.2. Perfilómetro

De modo a determinar o volume de material desgastado em cada pista de desgaste, foram usadas duas técnicas de medição. A primeira delas foi com recurso a um perfilómetro *Mitutoyo SJ-500*.

Com este equipamento, é possível determinar o volume da pista de desgaste efetuando diversos perfis bidimensionais transversalmente, ao logo da mesma, e, posteriormente, recorrendo a técnicas de integração numérica, na plataforma informática *Excel*, é possível calcular o volume de material desgastado.

Esta técnica de medição do volume da pista de desgaste é a mais confiável, pelo que durante todo o presente trabalho serão usados os valores que a técnica fornecer.

Na Figura 3.6 é possível observar um exemplo de um perfil, retirado na direção perpendicular à pista de desgaste de uma determinada amostra, com recurso ao perfilómetro mencionado anteriormente.

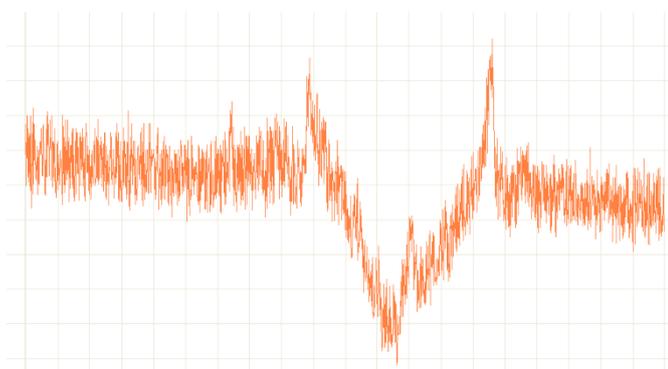


Figura 3.6. Perfil transversal à pista de desgaste

3.2.3. Microscópio Ótico

Uma vez que duas superfícies se encontram em contacto e deslizamento relativo, ocorre desgaste em ambas. Nos dois subcapítulos anteriores, foram explicitadas duas técnicas distintas para a determinação do volume de material desgastado nas amostras. Contudo, é necessário determinar, também, o volume de desgaste no contra corpo.

Para proceder ao anteriormente enunciado, foi usado microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes*, apresentado na Figura 3.7.



Figura 3.7. Microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes*

Este equipamento conta uma capacidade de ampliação de 15 vezes e é possuidor de iluminação de lâmpada circular, permitindo medir o diâmetro do ponto de contacto desgastado do contra corpo.

É possível efetuar essa medição, uma vez que este microscópio está equipado com uma plataforma móvel de posicionamento com dois micrómetros digitais, de montagem perpendicular, a si associados. Os dois micrómetros estão orientados segundo dois eixos, X e Y, respetivamente, apresentando uma precisão de 1×10^{-3} milímetros.

Visto isto, com recurso a este equipamento, é possível medir dois diâmetros, perpendiculares entre si, do ponto de contacto desgastado, no final de cada ensaio. Mais uma vez, com recurso a uma ferramenta de cálculo, como o *Excel*, é possível determinar o volume de desgaste – volume da calota esférica -, verificado no contra corpo, a cada ensaio realizado.

3.2.4. Microscópio Ótico com Máquina Fotográfica

O perfil de desgaste, verificado no contra corpo de cada ensaio, foi registado fotograficamente. O microscópio ótico com máquina fotográfica é composto por um microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ – 10*, de iluminação de lâmpada circular, com a máquina fotográfica *Cannon PowerShot A620*, a si acoplada.

Com este equipamento, é possível registar a área de contacto no contra corpo, observar material desgastado de ambos os corpos e a direção do plano preferencial de deslizamento do ensaio, tal como é possível observar na Figura 3.8.

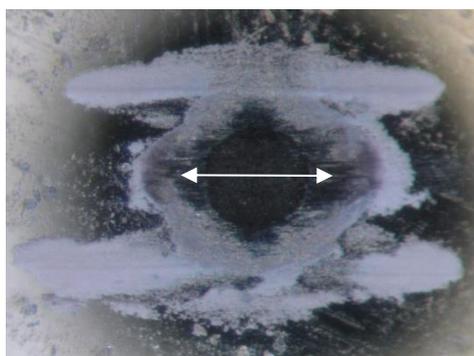


Figura 3.8. Material desgastado e plano preferencial de deslizamento no contra corpo

3.2.5. Microscópio Eletrônico de Varrimento

De modo a observar e determinar qual o mecanismo de desgaste desenvolvido nos dois corpos em contacto, bem como a distribuição e deposição do material desgastado foi usado um microscópio eletrónico de varrimento, marca *Philips* e modelo *XL30 TMP*.

3.3. Procedimentos

3.3.1. Planeamento de ensaios

Os parâmetros para a realização dos ensaios são vastos. Como tal, para a eleição dos parâmetros que mais influenciam e preponderância apresentam nos ensaios tribológicos, foi realizada uma abordagem baseada na comparação de métodos de ensaios, sendo o mais próximo do desgaste por deslizamento, o ensaio de *ball-cratering*.

Em *ball-cratering*, existem três parâmetros fundamentais, frequência, carga aplicada e tempo. Por analogia, e devido à semelhança que existe entre estes dois diferentes testes tribológicos, foram adotados para a realização do presente estudo, esses mesmos referidos parâmetros. Em Silva [25], num estudo que usou a técnica de desgaste por deslizamento, foram adotadas as variáveis frequência, carga aplicada e duração de cada ensaio.

A frequência de deslizamento do contra corpo foi normalizada, uma vez que a sua variação apresenta consequências práticas no modo como o desgaste se processa, e, com isto, conduz a alteração do perfil da pista de desgaste. Para que ocorra desgaste mensurável, é necessário que o tempo de realização de cada ensaio - ou número de ciclos, ou distância de deslizamento -, seja suficientemente elevado. Posto isto, e de modo a que os ensaios não tomem uma duração excessiva, a frequência foi fixada em 3 Hz.

De modo a simular pressões verificadas em aplicações práticas, foram usadas três diferentes forças normais. Na Tabela 3.3 é possível observar os diferentes parâmetros de referência quantificados.

Tabela 3.3. Condições de ensaios

Ensaio	Força (N)	Frequência (Hz)	Número de Ciclos	Duração (s)	Distância (m)
E - 1	17	3	125 000	41667	500
E - 2	23	3	125 000	41667	500
E - 3	23	3	200 000	66667	800
E - 4	28,9	3	125 000	41667	500

Com a informação explanada na tabela anterior, os ensaios tribológicos seguiram a ordem indicada, aplicados a cada uma das sete amostras C_i que constituem o estudo.

Tal como referido anteriormente, a frequência de deslizamento do contra corpo foi normalizada, fixada em 3 Hz, e foram usadas apenas três cargas distintas de 17, 23 e 28,9 N, sendo estas as forças necessárias para simular esforços reais a que os materiais em estudo são tipicamente sujeitos. Como o tempo de realização dos ensaios está intrinsecamente relacionado com o número de ciclos e com a distância de deslizamento, apenas era necessário fixar uma dessas variáveis. Então, verificou-se que 125 000 mil ciclos resultavam em desgaste mensurável e suficiente para que o coeficiente de atrito fosse indubitavelmente calculado, visto que este estabilizava num valor praticamente constante a partir de um determinado número de ciclos, correspondendo à fase estacionária. Contudo, em cada amostra, um ensaio foi realizado com um maior número de ciclos - 200 000 - um valor consideravelmente superior, funcionando como um ensaio de controlo de modo a confirmar a tese anteriormente apresentada.

Posto isto, é necessário determinar, através da teoria de contacto hertziano, proposta por Stachowiak e Batchelor [26], diversos dados auxiliares, que justificam matematicamente a seleção da geometria do contra corpo e do seu diâmetro. Esses dados são pressão máxima e raio de contacto, sendo que a geometria da área de contacto é uma circunferência. Os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Contacto Hertziano

Amostra	P (GPa)	R_{contacto} (µm)
C1	0,896 – 1,605	49,737 – 54,347
C2	0,902 – 1,615	49,657 – 54,260
C3	0,901 – 1,613	49,673 – 54,278
C4	0,973 – 1,743	48,716 – 53,232
C5	0,879 – 1,574	49,974 – 54,606
C6	0,923 – 1,652	49,375 – 53,952
C7	0,900 – 1,612	49,681 – 54,286

O presente estudo promove o deslizamento relativo de dois corpos com contacto não lubrificado. Assim, é possível estudar as interações que ocorrem no mesmo e em ambos os corpos, bem como o desgaste que daí resultará.

Quanto ao controlo do meio envolvente, este é inexistente, ou seja, não foi controlado qualquer aspeto ambiental, como por exemplo humidade relativa do ar, temperatura do mesmo, pressão atmosférica e espécies de gases presentes. Em suma, os ensaios tribológicos foram realizados mediante as condições verificadas à data da realização de cada ensaio, existindo apenas o registo da humidade relativa, verificada dentro do laboratório, aquando do início de cada ensaio. Desprovidos de qualquer monitorização eletrónica, e derivado à sua extensa duração – cerca de 11,5 horas para os ensaios cuja distância de deslizamento se fixa em 500 metros e cerca de 18,5 horas para os ensaios com uma correspondente distância de deslizamento de 800 metros – torna-se humanamente impossível a permanência junto da experiência, com a finalidade de registar, periodicamente, a humidade verificada na atmosfera envolvente ao longo da realização de cada teste tribológico, bem como o registo da mesma variável quando cada ensaio finda.

Uma vez que está em questão o contacto entre metais duros, estes são muito propícios à formação de subprodutos provenientes do desgaste. Então, este tipo de ensaio é fortemente influenciado pela variação de humidade do ar e pela concentração de oxigénio molecular, sendo estes fornecedores de oxigénio ao sistema, permitindo a formação de óxidos. Estes óxidos formam-se nas superfícies onde está a ocorrer desgaste. Os óxidos apresentam, na sua generalidade, dureza superior, influenciando assim o modo como varia a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito.

3.3.2. Método de Montagem no Tribómetro

Posto isto, é necessário conhecer mais em pormenor a montagem onde os ensaios terão lugar. Esta é escrutinada sob a forma de esquema na Figura 3.9, retirada e adaptada de Silva (25).

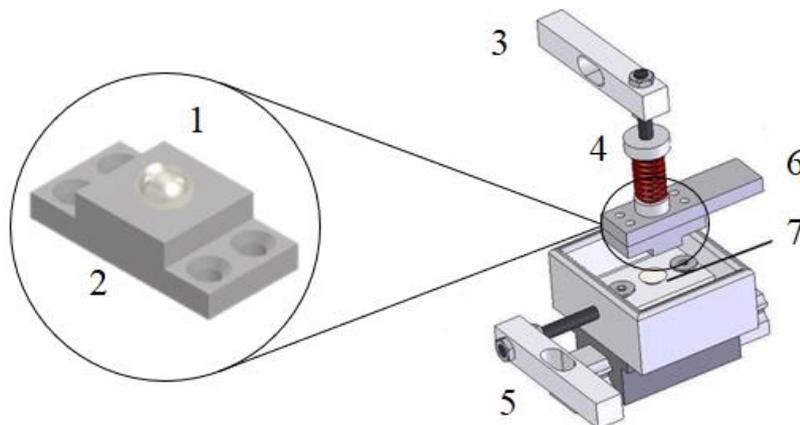


Figura 3.9. Montagem pormenorizada dos pontos de colocação das amostras e do contra corpo

A esfera (1), que desempenha o papel de contra corpo, é fixada no suporte por intermédio de encaixe cónico (2), que por sua vez é acoplado ao adaptador oscilante (6). O componente (6) apresenta movimento horizontal. A amostra em estudo é fixada no suporte estático (7).

A carga é aplicada através de uma força normal, conseguida com recurso ao sistema parafuso-fêmea-mola (4). Esta força normal é quantificada através da célula de carga orientada segundo a normal (3). Como se verifica a presença de movimento horizontal, e ocorre deslizamento entre as duas superfícies, que gera atrito e, conseqüentemente, desenvolve-se, então, uma força tangencial, sendo a sua intensidade medida através da segunda célula de carga (5).

O tribómetro possui um veio rotativo, no qual o seu centro de gravidade coincide com o ponto no qual os momentos são nulos. Contudo, para que o desejado movimento alternativo horizontal ocorra, é necessário transformar o movimento de rotação do veio. Para tal, recorre-se a um componente no qual o centro de gravidade não coincide com o ponto em que os momentos são nulos, tornando assim o movimento rotativo do veio excêntrico e surge então o pretendido movimento alternativo horizontal. Este movimento é posteriormente direcionado segundo a orientação pretendida.

De ressaltar que com o mesmo contra corpo é possível realizar vários ensaios, sendo necessário ter o devido cuidado de, aquando da colocação do mesmo no seu suporte,

a área do contra corpo que vai estabelecer contacto com a amostra não coincida com a área onde ocorreu contacto com a amostra num outro ensaio.

3.3.3. Procedimento Experimental

Antes de se iniciar a realização dos ensaios tribológicos, é necessário proceder à calibração das células de carga. A realização desta calibração é essencial, de modo a aferir que os resultados fornecidos pelo tribómetro são fidedignos e correspondem às forças que verdadeiramente se verificam e desenvolvem durante a realização dos referidos ensaios. A análise e descrição da calibração das células de carga encontram-se no APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA.

Os ensaios tribológicos realizados, consistem no movimento relativo e alternativo do contra corpo selecionado relativamente a cada amostra em estudo.

Tanto as amostras como o contra corpo, são fornecidos em tamanho e acabamento superficial normalizados, não havendo qualquer necessidade de intervenção, tanto a nível dimensional como ao nível de acabamento. Existe apenas um pequeno cuidado de limpeza imediatamente antes da realização de cada ensaio tribológico, sendo conveniente proceder à remoção de impurezas superficiais recorrendo a álcool etílico conjuntamente com uma toalha de papel.

O procedimento experimental do presente trabalho foi previamente definido, tendo como objetivo normalizar as ações necessárias a realizar, para que este não interferisse com os resultados futuros que advirão.

A primeira etapa foi a colocação da amostra no seu suporte e respetiva fixação. De seguida, foi necessário colocar o contra corpo no seu suporte e fixar este conjunto ao adaptador oscilante. Posteriormente, alinhou-se o contra corpo com a amostra, de modo a que nenhum ensaio de cada quarteto de ensaios se sobreponha. Tendo isto realizado, abre-se o programa dedicado ao funcionamento do tribómetro e aquisição de dados e insere-se as variáveis, previamente definidas, correspondentes ao ensaio a realizar. Antes de se aplicar a carga normal, é fundamental “zerar” as células de carga e, então, aplica-se a carga normal, por intermédio do sistema parafuso-fêmea-mola, promovendo o contacto contra corpo-amostra. Para iniciar a realização do ensaio tribológico, basta clicar no botão *Start* da interface.

Quando um ensaio finda, remove-se a carga normal aplicada, retira-se o contra corpo para registo fotográfico do desgaste, limpeza, determinação do volume desgastado e seu reposicionamento no respetivo suporte.

Este procedimento foi repetido quatro vezes por amostra, correspondendo ao quarteto de ensaios E – i. Tendo realizado o quarteto de ensaios numa amostra, esta foi removida do suporte estático e substituída pela seguinte.

Quando uma dada amostra foi retirada do tribómetro, esta seguiu para realização de microscopia eletrónica de varrimento, sem proceder a qualquer remoção ou limpeza de material depositado na sua superfície em estudo. No SEM, foi analisado o desgaste e deposição do material resultante dos ensaios tribológicos, tendo realizado o seu registo fotográfico.

Retirada a amostra do SEM, seguiu para limpeza superficial e remoção de impurezas. Posto isto, foi implementada a técnica de perfilometria, realizando a medição de perfis nas pistas de desgaste.

Por fim, e todas as etapas concluídas, reservou-se a amostra e procedeu-se à coletânea dos dados obtidos pelo tribómetro para a construção das curvas de atrito, cálculo do coeficiente de atrito médio e sua variação; recolha dos registos fotográficos do contra corpo após desgaste; recolta das imagens resultantes da análise de SEM; coletânea dos dados resultantes de perfilometria para determinação do volume das pistas de desgaste.

Este foi o procedimento criteriosamente seguido para a realização do estudo tribológico de todas as amostras que constituem a presente dissertação.

No entanto, apenas foi explicitado até ao momento, o procedimento experimental, desprovido da demonstração dos métodos de cálculo seguidos. Visto isto, nos subcapítulos seguintes, é descrito como os dados provenientes do tribómetro e do perfilómetro foram tratados e manipulados.

3.3.4. Curva e Coeficiente de Atrito

Os ensaios tribológicos fornecem leituras de duas forças: força normal e força transversal. Efetuando o quociente entre a força transversal e a força normal, num dado instante de tempo, obtém-se o coeficiente de atrito instantâneo. Com a agregação de todos os coeficientes de atrito instantâneos obtidos durante cada ensaio, é possível construir uma curva que representa a evolução do coeficiente de atrito, para determinada amostra, em

determinadas condições, quer físicas, quer ambientais, sendo como que uma impressão digital do ensaio tribológico.

Tal como referido anteriormente, o ensaio tribológico fornece, essencialmente, dados que permitem a construção de um gráfico de coeficiente de atrito em função do tempo, tal como aquele que é possível visualizar na Figura 3.10, onde é representada uma curva de atrito.

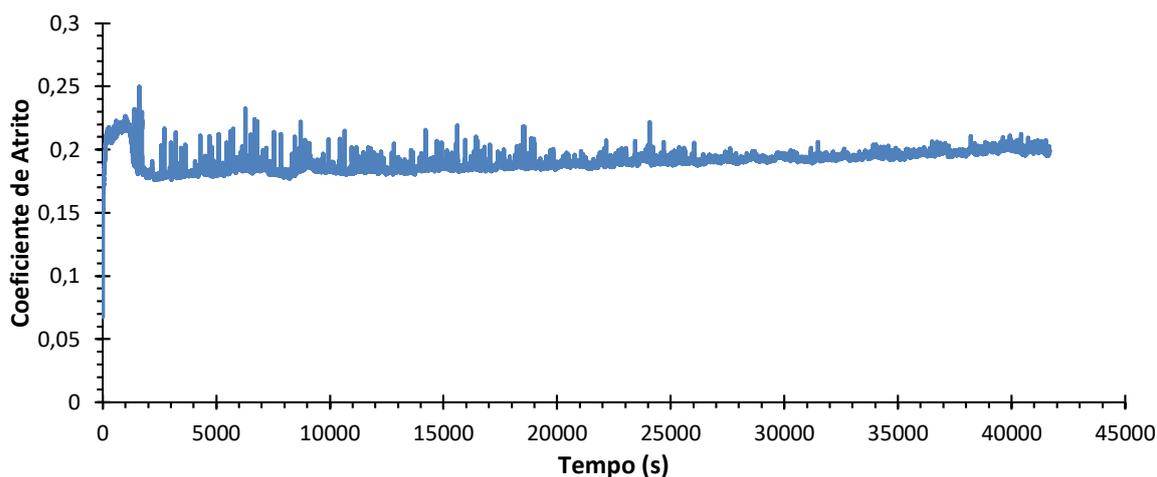


Figura 3.10. Curva de atrito construída a partir de uma ensaio tribológico

Tipicamente, um gráfico de coeficiente de atrito em função do tempo, subdivide-se em três secções principais.

A primeira, denominada por *running in*, em que o coeficiente de atrito aumenta até atingir um valor máximo onde estabiliza, sob a forma de planalto, embora praticamente impercetível. Este rápido aumento do coeficiente de atrito deve-se às asperidades de ambos os corpos no início de realização dos ensaios.

À medida que as asperidades são removidas, os corpos adaptam-se mutuamente e surge um polimento perfeito na superfície de ambas as amostras, promovendo, assim, a redução do coeficiente de atrito. Este fenómeno corresponde à segunda secção da curva de atrito, em que ocorre um decréscimo do coeficiente de atrito, até este atingir um mínimo no qual estabiliza.

A terceira secção da curva de atrito corresponde à fase estacionária de realização dos ensaios, na qual o atrito adquire tendência constante. Essa tendência constante, não implica, necessariamente, que a curva se reja por uma lei afim linear, podendo demonstrar tendência constante crescente, sendo este o cenário do gráfico apresentado na Figura 3.10.

No entanto, ao longo da curva de atrito, surgem, frequentemente, picos nos quais o atrito cresce de modo abrupto e diminui em igual forma, voltando aos valores que este

admitia imediatamente antes do referido pico. Estes picos justificam-se através de variações locais da humidade do ar e com variação, também locais, das propriedades dos corpos em contacto.

Os picos anteriormente descritos e justificados, deturpam e influenciam os resultados. De modo a anemizar a sua expressiva influência, foi aplicado um filtro, sob a forma de média móvel de 50 pontos, aos dados das forças normal e transversal. Esta suavização da curva de atrito desemboca no gráfico presente na Figura 3.11.

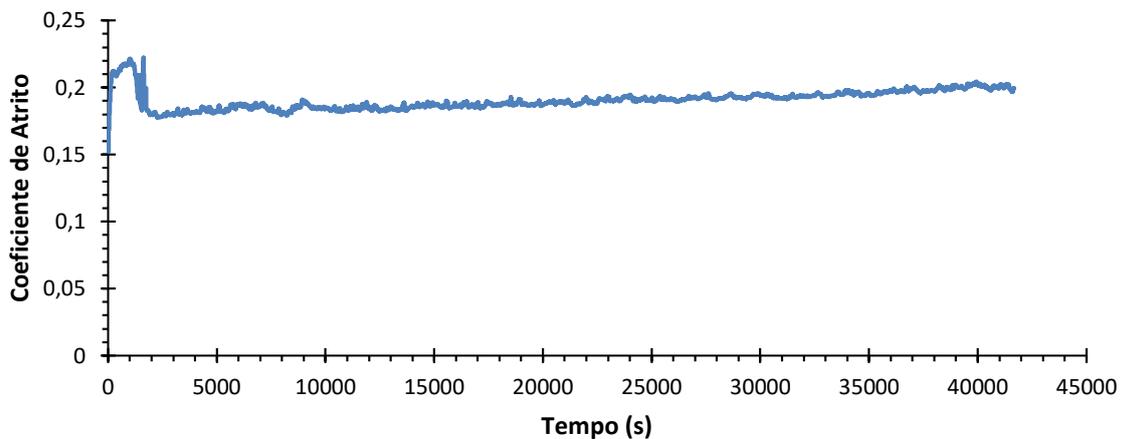


Figura 3.11. Curva de atrito amenizada construída a partir de um ensaio tribológico

calculado com recurso à secção da curva de atrito referente à sua fase estacionária. O coeficiente de atrito instantâneo é determinado através do quociente entre a força transversal e a força normal, tal como demonstra a equação (3.1)

$$COF_{inst} = \frac{F_T}{F_N} \quad (3.1)$$

Como é desejado conhecer o coeficiente de atrito médio, basta aplicar a média aritmética ao COF_{inst} , tal como mostra a expressão matemática (3.2)

$$COF_m = \frac{\sum COF_{inst}}{n_{COF_{inst}}} \quad (3.2)$$

Com estes dados, serão construídos gráficos de barras demonstrativos do coeficiente de atrito médio de cada ensaio tribológico, organizados por amostras.

3.3.5. Variação do Coeficiente de Atrito Médio

De modo conferir maior credibilidade ao cálculo do coeficiente de atrito médio é desejável proceder ao cálculo da variação do coeficiente de atrito médio. O coeficiente de atrito médio é uma função dependente das forças normal e transversal, tal como mostra a equação (3.3).

$$COF = f(F_T, F_N) \tag{3.3}$$

Logo, o cálculo da variação do coeficiente de atrito médio rege-se pela expressão (3.4).

$$\Delta COF = f(\Delta F_T, \Delta F_N) \tag{3.4}$$

Para tal, é usada a equação matemática (3.5).

$$\Delta COF = \sqrt{\frac{\partial COF}{\partial F_T} \cdot \Delta F_T^2 + \frac{\partial COF}{\partial F_N} \cdot \Delta F_N^2} \tag{3.5}$$

3.3.6. Volume da Pista de Desgaste

Com as células de carga e o programa criado na plataforma informática *LabView*, são medidas a força normal e tangencial e, conseqüentemente, é calculado o coeficiente de atrito instantâneo. Os sucessivos valores do coeficiente de atrito instantâneo são apresentados num gráfico em função do tempo, na interface do programa. Uma vez que a carga aplicada é constante e a força de atrito varia em cada instante, demonstra que a energia dissipada por atrito também varia. Visto isto, a energia dissipada no deslizamento pode ser correlacionada com o desgaste.

Reye foi pioneiro na formalização de uma expressão matemática para a determinação do volume desgastado. O seu modelo afirma que o volume de material desgastado é proporcional ao trabalho realizado pela força tangencial e com a distância total de realização de cada ensaio, que se traduz pela expressão matemática (3.6).

$$\frac{V}{x} = \frac{F_T}{\tau} \tag{3.6}$$

Embora apresente resultados coerentes e confiáveis, esta formulação torna-se complexa devido à necessidade de determinar a tensão de corte, τ .

Posto isto, Archard propôs mais tarde uma expressão matemática (3.7).

$$\frac{V}{x} = \frac{K F_N}{H} \quad (3.7)$$

Esta expressão é mais simples quando comparada com a expressão proposta por Reye, uma vez que todas as variáveis são conhecidas e/ou facilmente calculadas.

Posteriormente, Czichos munuiu-se da formulação matemática de Archard e trabalhou-a matematicamente, concatenando os fatores K e H da expressão (3.7) apenas num fator k, resultado assim expressão (3.8).

$$V = kNx \quad (3.8)$$

A formulação de Archard, e consequentemente a adaptação de Czichos, tal como a de Reye, proporcionam resultados igualmente coerentes e confiáveis, no entanto, F_N apresenta direção perpendicular ao contacto e ao plano de realização dos ensaios, logo esta força não realiza trabalho, tornando-se difícil de explicar a sua interferência no cálculo do volume desgastado. Como a expressão de Archard foi deduzida analiticamente, demonstra, como fragilidade, a inexplicável relação entre o volume desgastado e a força normal, sendo esta uma incongruência do modelo de Archard.

Coulomb adota a simplificação de Czichos e trabalha-a matematicamente, aplicando a substituição sugerida pela equação (3.9), de modo a que a sua formulação apresente o volume desgastado em função do coeficiente de atrito e da força de atrito, obtendo assim a equação (3.10).

$$F_a = \mu N \quad (3.9)$$

$$V = k \frac{F_a}{\mu} x = \left(\frac{k}{\mu}\right) F_a x = k' F_a x \quad (3.10)$$

Nesta nova equação, devido à sua não dependência da força normal, e por ter em conta o coeficiente de atrito, as incongruências parecem agora dissipadas, uma vez que a força de atrito é a única força presente no sistema a realizar trabalho. Logo, esta é a equação de abordagem clássica e analítica que melhor traduz o volume de material desgastado.

As formulações anteriores adequam-se quando se está perante coeficientes de atrito constantes, que não variam significativamente durante a realização de ensaios, o que

não se verifica neste caso. Como ocorre essa variação do coeficiente de atrito é necessário tê-la em conta, não a descartando ou assumir como desprezável.

Mais uma vez, recorrendo a uma avaliação energética, Ramalho e Miranda [27] formularam um método de cálculo energético aprimorado para a determinação do volume desgastado, representado pelas equações (3.11) e (3.12).

$$V = k' \int_x F(x) dx = k'v \int_t F(t) dt \quad (3.11)$$

$$V = k' \sum_i \bar{F} x_i \Delta x_i = k'v \sum_i \bar{F} t_i \Delta t_i \quad (3.12)$$

No presente estudo, pretende-se calcular o volume de material desgastado com elevado grau de precisão, pelo que o seu cálculo será realizado com auxílio do perfilómetro e técnicas de integração. Posto isto, é necessário conhecer a forma geométrica da pista de desgaste, de modo a refletir sobre o modo com a referida será realizada.

Na Figura 3.12 encontra-se representado um esquema da pista de desgaste.

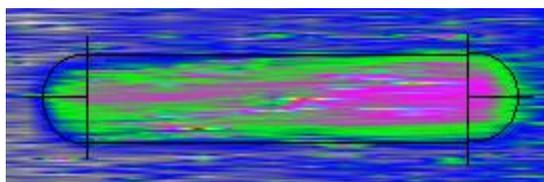


Figura 3.12. Esquema da divisão geométrica da pista de desgaste para o cálculo do volume desgastado

Através da visualização da pista de desgaste, da perspetiva do alçado superior, esta apresenta uma calote em cada extremo – calote 1 à esquerda e calote 2 à direita - e o corpo de forma retangular. Em corte, esta apresenta uma geometria semicircular.

Primeiramente, é necessário encontrar o limite que separa a calote 1 do corpo da pista de desgaste. Após descoberto e localizado este limite, considera-se o mesmo como sendo a origem para tiragem de perfis transversais à amostra, e, conseqüentemente, o primeiro perfil retirado apresenta dois propósitos: permite calcular o volume da calota 1 e é o primeiro contributo para o cálculo da área transversal média da pista de desgaste. Posteriormente, são retirados perfis com igual espaçamento entre si que corresponde a 200 micrómetros. Por fim, e aquando do alcance do final da pista de desgaste, é necessário, mais uma vez, localizar o limite que separa o corpo da pista de desgaste da calota 2. Quando identificado este limite, retira-se o último perfil da pista de desgaste e, tal como o primeiro perfil retirado, este desempenha, um duplo papel na referida metodologia de cálculo.

Os perfis fornecidos pelo perfilômetro, por si só, não fornecem valores de volume da pista de desgaste. Para isso, é necessário proceder ao nivelamento dos perfis, sendo considerado nivelado quando totalmente sobreposto no eixo das abcissas. Tal como a curva de atrito proveniente diretamente dos dados do tribómetro, a curva construída com os dados fornecidos pelo perfilômetro apresentam picos, neste caso negativos, sendo necessário, mais uma vez, amenizar essas variações bruscas locais. Para isso, foi aplicada uma média móvel de 20 valores. A área de cada perfil, que se encontra na zona central negativa do gráfico, representa a área projetada da pista de desgaste em determinada posição.

Na Figura 3.13 é possível observar um perfil transversal à pista de desgaste, nivelado e amenizado.

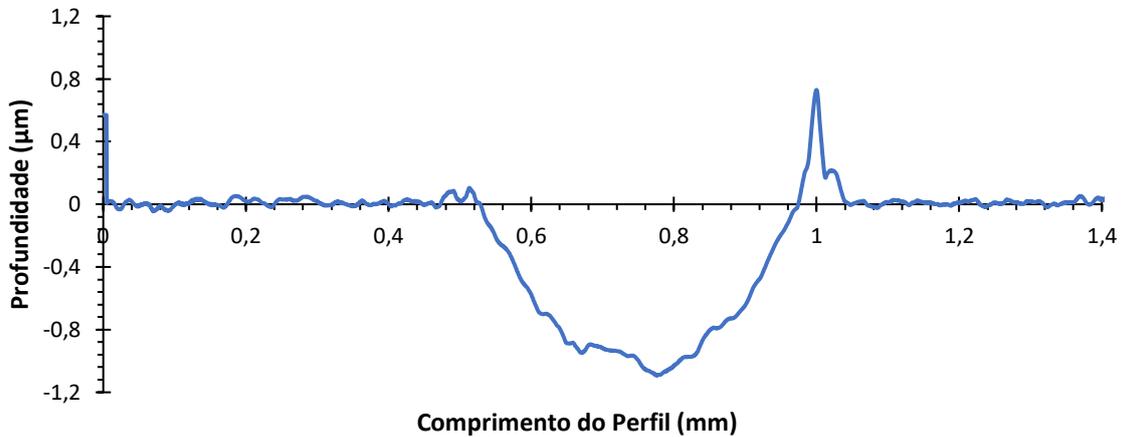


Figura 3.13. Nivelamento e amenização de um perfil retirado de uma pista de desgaste

Visto isto, o volume das calotas será calculado a partir da equação (3.13).

$$A_i(r_i \times \theta) = dV_{calote,i} \quad (3.13)$$

Em que:

$$A_i = \frac{1}{2}(y_i - y_{i+1}) \times (x_{i+1} - x_i) \quad (3.14)$$

$$x_i = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \quad (3.15)$$

$$\Delta M_{1i} = x_i A_i \quad (3.16)$$

$$x_{CG} \times \sum A_i = \sum M_{1i} \quad (3.17)$$

Logo:

$$r_i = x_{CG} - x_i \quad (3.18)$$

Para este método é necessário subdividir cada calota em duas áreas de menor dimensão, de modo a respeitar a inequação (3.19).

$$-90 \leq \theta \leq 0 \wedge 0 \leq \theta \leq 90 \quad (3.19)$$

Quanto ao cálculo do volume do corpo da pista de desgaste, é mais simples de realizar, uma vez que este é dado pela equação (3.20).

$$V_{corpo} = \sum l \times dA = \sum l \times \frac{1}{2} (y_i + y_{i+1}) (x_{i+1} - x_i) \quad (3.20)$$

Visto isto, a equação (3.21) demonstra o volume total da pista de desgaste.

$$V_{pista\ desgaste} = V_{calote\ 1} + V_{calote\ 2} + V_{corpo} \quad (3.21)$$

3.3.7. Taxa Específica de Desgaste das Amostras

A equação (3.8), proposta por Czichos, afirma que o volume de material desgastado é diretamente proporcional ao produto entre a taxa específica de desgaste, a carga normal aplicada e a distância de deslizamento.

A taxa específica de desgaste caracteriza a velocidade a que determinado material é desgastado em função de uma carga normal aplicada e de uma distância de deslizamento. Cada material possui uma taxa de desgaste que o caracteriza.

Nesta equação, duas variáveis são conhecidas, pois foram estabelecidas inicialmente para a realização dos ensaios tribológicos: a carga normal aplicada e a distância de deslizamento. Quanto ao volume de material desgastado, este é determinado através de técnicas de integração. Logo, resta apenas uma variável que não é explicitamente conhecida ou determinada numericamente: a taxa específica de desgaste.

De modo a quantificar a taxa específica de desgaste, para cada um dos sete materiais em estudo, foi construído um gráfico de dispersão de pontos do volume de material desgastado em função do produto entre a carga aplicada e a distância de deslizamento,

denominado por severidade, composto pelos quatro ensaios tribológicos realizados por amostra.

Tendo construído o gráfico de dispersão de pontos, basta aplicar uma regressão linear ao mesmo, em que o declive da regressão linear surge como sendo a taxa específica de desgaste de cada material, tal como demonstra a Figura 3.14.

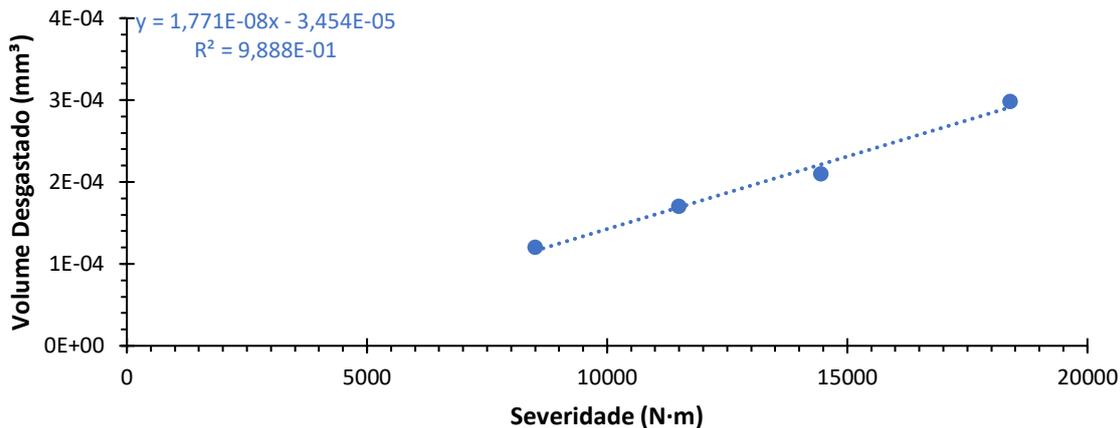


Figura 3.14. Taxa específica de desgaste de uma amostra

3.3.8. Volume Desgastado no Contra Corpo

O volume da cratera resultante do desgaste é facilmente determinado. Com o auxílio do microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes* são medidos dois diâmetros da cratera, perpendiculares entre si. Através da equação (3.22) é determinada a profundidade da mesma.

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (3.22)$$

E, por fim, o volume é determinado através da equação (3.23).

$$V = \frac{\pi}{3} h^2 (3R - h) \quad (3.23)$$

3.3.9. Taxa Específica de Desgaste do Contra Corpo

À semelhança do que foi realizado para as amostras, também é necessário determinar a taxa específica de desgaste do contra corpo referente a cada quarteto de ensaios realizados nas amostras. Para isso, é seguido exatamente o mesmo método utilizado no caso das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios tribológicos e nos cálculos anteriormente explicitados, sendo os mesmos posteriormente discutidos e analisados.

Este capítulo encontra-se dividido em dois subcapítulos, o primeiro, que corresponde à demonstração de resultados obtidos, e um segundo subcapítulo de discussão desses mesmos resultados.

Na demonstração de resultados, primeiramente, será realizada uma explanação esmiuçada e criteriosa de todos os dados e resultados obtidos para a amostra C1. Posteriormente, de modo a viabilizar a demonstração dos resultados obtidos, para as restantes seis amostras, na extensão útil permitida, apenas um resumo dos resultados obtidos das mesmas será explanado no corpo do presente trabalho. Contudo, cada uma das amostras é alvo, tal como no caso da amostra C1, de uma exaustiva e aprofundada análise, que se encontra em apêndice.

De seguida, é feita uma comparação interamostras. O critério de comparação mais simples e sóbrio, de modo a compreender e analisar os resultados obtidos, é por ensaios.

Nos parâmetros analisados, inclui-se o coeficiente de atrito e o volume de material desgastado, expresso sob a forma de taxa específica de desgaste, tanto nas amostras, bem como em cada contra corpo, correspondente a cada ensaio realizado, consoante a carga aplicada e a distância de deslizamento.

4.1. Demonstração de Resultados

4.1.1. Amostra C1

4.1.1.1. Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada

ensaio tribológico. Na Tabela 4.1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela 4.1 Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C1

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	60
E - 2	52
E - 3	44
E - 4	44

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C1, é de 16%.

Tal como referido anteriormente, o primeiro conjunto de dados, fornecido pelo tribómetro, permite construir uma curva de atrito em função do tempo. Na Figura 4.1 é possível observar as curvas de atrito correspondentes ao quarteto de ensaios tribológicos realizados na amostra C1.

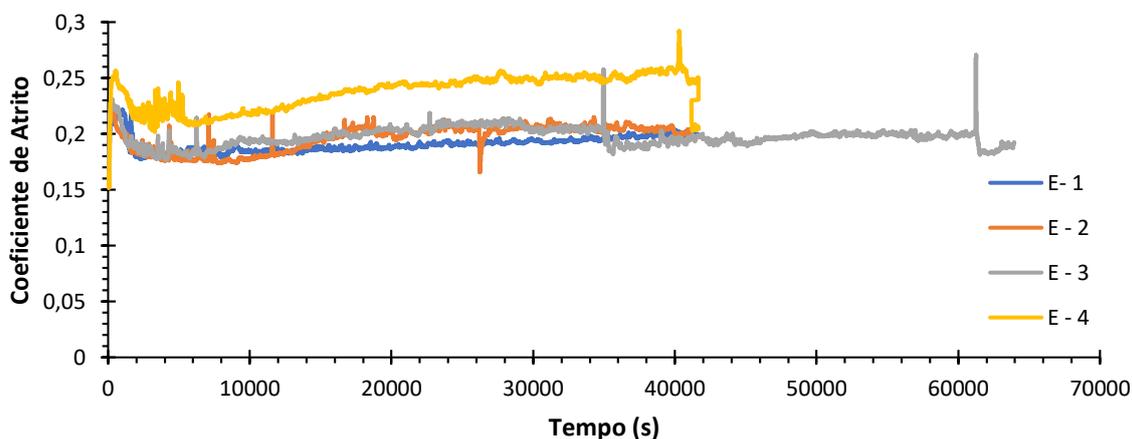


Figura 4.1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios na amostra C1

Verifica-se que, para a carga de menor intensidade, ensaio E – 1, a curva de atrito é inferior às demais. Para as curvas correspondentes aos ensaios E – 2 e E – 3, o que as distingue é a distância de deslizamento, sendo que se verifica que a diferença de distância de deslizamento não influenciou os resultados. Estas encontram-se muito próximas,

posicionadas entre a curva E – 1, abaixo delas, e a E – 4, acima das mesmas. Por fim, a curva cuja carga normal é a mais elevada, E – 4, apresenta-se acima das restantes.

4.1.1.2. Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura 4.2.

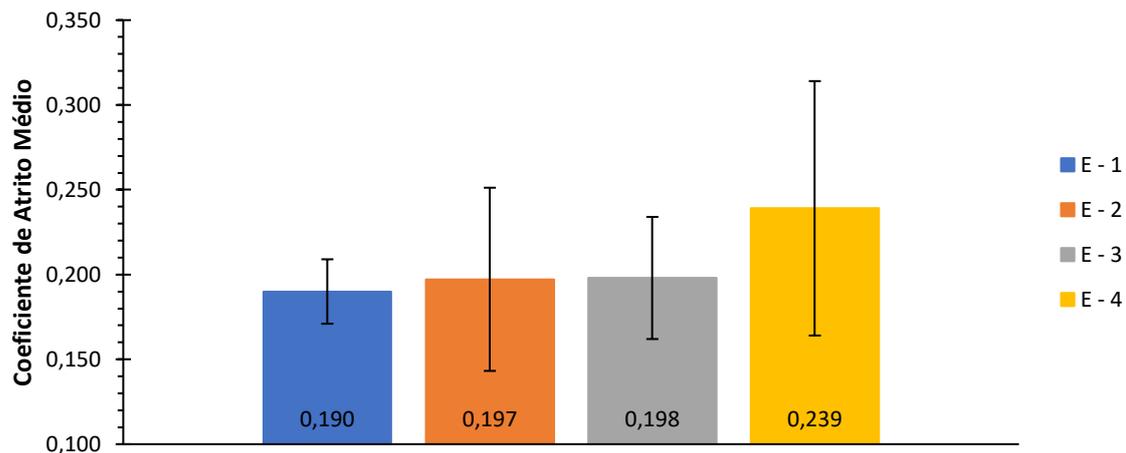


Figura 4.2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C1

Tal como referido anteriormente, o ensaio E – 1 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,190. Relativamente aos ensaios E – 2 e E – 3, estes apresentam um valor de coeficiente de atrito médio praticamente igual, de 0,197 e 0,198 respetivamente. Logo, é possível concluir que, para WC-Co, a distância de deslizamento não interfere no coeficiente de atrito, tendo sido claramente ultrapassada a fase de rodagem e foi atingido o regime estacionário. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,239. O coeficiente de atrito médio da amostra C1 é de 0,206.

4.1.1.3. Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C1, encontram-se apresentados na Tabela 4.2 e representados na Figura 4.2.

Tabela 4.2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C1

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,190	0,019
E – 2	0,197	0,054
E – 3	0,198	0,036
E – 4	0,239	0,075

4.1.1.4. Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela 4.3, bem como a severidade.

Tabela 4.3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C1

Ensaio	V_{PD} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$1,314 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$1,795 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$3,280 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$2,140 \cdot 10^{-4}$	14450

Tal como se pode observar na Tabela 4.3, o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e, no ensaio E – 3, verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade.

4.1.1.5. Taxa Específica de Desgaste da Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura 4.3.

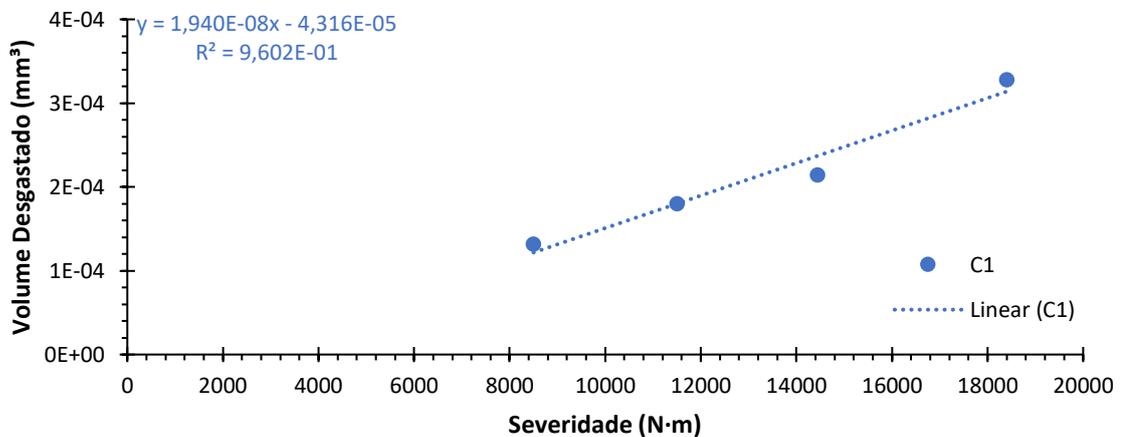


Figura 4.3. Taxa específica de desgaste da amostra C1

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C1 possui uma taxa específica de desgaste de $1,940 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, que permite concluir que, para a amostra C1, o volume de desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

4.1.1.6. Volume Desgastado do Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio no contra corpo CC1

Ensaio	$V_{CC} \text{ (mm}^3\text{)}$	Severidade (N·m)
E – 1	$6,210 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$7,488 \cdot 10^{-5}$	11500
E – 3	$1,367 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$9,246 \cdot 10^{-5}$	14450

À semelhança da evolução verificada no volume das pistas de desgaste, o volume desgastado no contra corpo evolui de igual modo, ou seja, o menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 3.

4.1.1.7. Taxa Específica de Desgaste do Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura 4.4.

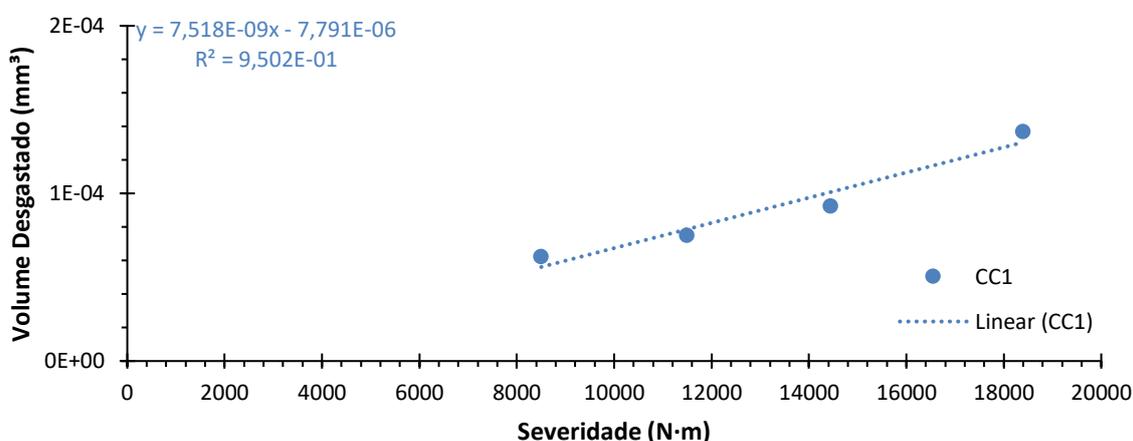


Figura 4.4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC1

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $7,518 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

4.1.2. Amostra C2

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C2, é de 12%.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste,

correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C2 e do contra corpo CC2

Ensaio	COF_m	ΔCOF	k_C (mm ³ /N·m)	k_{CC} (mm ³ /N·m)
E – 1	0,220	0,028		
E – 2	0,223	0,048	$2,010 \cdot 10^{-8}$	$5,718 \cdot 10^{-9}$
E – 3	0,240	0,077		
E – 4	0,254	0,136		

Através da análise da tabela anterior, é possível afirmar que o coeficiente de atrito varia muito pouco com o aumento de carga aplicada. O coeficiente de atrito médio menor, deste conjunto de ensaios, corresponde ao ensaio E – 1, com um valor de 0,220. Para a mesma carga aplicada, e derivado ao facto das condições de ensaios serem uniformizadas no que a procedimentos diz respeito. Os ensaios E – 2 e E – 3, possuem coeficientes de atrito médio bem distintos, de 0,223 e 0,240, respetivamente. O maior coeficiente de atrito médio corresponde ao ensaio E – 4, de valor 0,254. O coeficiente de atrito médio da amostra C2 é de 0,234.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C2, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C2 possui uma taxa específica de desgaste de $2,010 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $5,718 \cdot 10^{-9}$ mm³/N·m.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C2, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE B – AMOSTRA C2.

4.1.3. Amostra C3

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C3, é de apenas 6%.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste, correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C3 e do contra corpo CC3

Ensaio	COF_m	ΔCOF	k_C (mm ³ /N·m)	k_{CC} (mm ³ /N·m)
E – 1	0,214	0,054	$1,489 \cdot 10^{-8}$	$7,133 \cdot 10^{-9}$
E – 2	0,230	0,049		
E – 3	0,240	0,094		
E – 4	0,241	0,052		

Através da análise da tabela anterior, é possível afirmar que o coeficiente de atrito varia muito pouco com o aumento de carga aplicada. O coeficiente de atrito médio menor, deste conjunto de ensaios, corresponde a E – 1, com um valor de 0,214. Os ensaios E – 2 e E – 3, uma vez que possuem coeficientes de atrito médio bem distintos, de 0,230 e 0,240, respetivamente. O maior coeficiente de atrito médio corresponde ao ensaio E – 4, de valor 0,241. Contudo, este apresenta um valor extremamente próximo do ensaio E – 3, embora a carga aplicada em E – 4 seja substancialmente superior comparativamente com E – 3. O coeficiente de atrito médio da amostra C3 é de 0,231.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C3, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C3 possui uma taxa específica de desgaste de $1,489 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $7,133 \cdot 10^{-9}$ mm³/N·m.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C3, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE C – AMOSTRA C3.

4.1.4. Amostra C4

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C4, é de somente 4%, pelo que uma tão reduzida variação de humidade relativa não influencia os futuros resultados que advirão dos ensaios tribológicos.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste, correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C4 e do contra corpo CC4

Ensaio	COF_m	ΔCOF	k_C (mm ³ /N·m)	k_{CC} (mm ³ /N·m)
E – 1	0,215	0,026	$1,636 \cdot 10^{-8}$	$1,042 \cdot 10^{-8}$
E – 2	0,214	0,022		
E – 3	0,210	0,043		
E – 4	0,242	0,048		

Através da análise da tabela anterior, é possível afirmar que o coeficiente de atrito varia muito pouco com o aumento de carga aplicada. O ensaio E – 3 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,210. Quanto ao ensaio E – 2, o coeficiente de atrito médio é superior ao ensaio E – 2, fixando-se em 0,214. O ensaio E – 1 apresenta um coeficiente de atrito médio semelhante ao do ensaio E – 2, apresentando um valor de 0,215. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,242. O coeficiente de atrito médio da amostra C4 é de 0,220.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C4, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C4 possui uma taxa específica de desgaste de $1,636 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a

determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $1,042 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C4, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE D – AMOSTRA C4.

4.1.5. Amostra C5

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C5, é de 17%.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste, correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C5 e do contra corpo CC5

Ensaio	COF_m	ΔCOF	k_C ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)	k_{CC} ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
E – 1	0,230	0,042	$2,123 \cdot 10^{-8}$	$1,207 \cdot 10^{-8}$
E – 2	0,249	0,054		
E – 3	0,250	0,056		
E – 4	0,281	0,092		

Através da análise da tabela anterior, é possível afirmar que o coeficiente de atrito varia muito pouco com o aumento de carga aplicada. O coeficiente de atrito médio menor, deste conjunto de ensaios, corresponde a E – 1, com um valor de 0,230. Os ensaios E – 2 e E – 3 possuem coeficientes de atrito médio praticamente iguais de 0,249 e 0,250, respetivamente. O maior coeficiente de atrito médio corresponde ao ensaio E – 4, de valor 0,281. O coeficiente de atrito médio da amostra C5 é de 0,253.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C5, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado

em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C5 possui uma taxa específica de desgaste de $2,123 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $1,207 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C5, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE E – AMOSTRA C5.

4.1.6. Amostra C6

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C6, é de 12%.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste, correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C6 e do contra corpo CC6

Ensaio	COF_m	ΔCOF	$k_C \text{ (mm}^3/\text{N}\cdot\text{m)}$	$k_{CC} \text{ (mm}^3/\text{N}\cdot\text{m)}$
E – 1	0,287	0,106	$1,336 \cdot 10^{-8}$	$6,654 \cdot 10^{-9}$
E – 2	0,262	0,076		
E – 3	0,289	0,078		
E – 4	0,277	0,041		

O ensaio E – 2 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,262. Quanto ao ensaio E – 4, o coeficiente de atrito médio fixa-se em 0,277. Por fim, os ensaios E – 1 e E – 3 apresentam coeficientes de atrito médio semelhantes e como os mais elevados do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixaram em 0,287 e 0,289, respetivamente. O coeficiente de atrito médio da amostra C6 é de 0,279.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C6, e após construção do respectivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C6 possui uma taxa específica de desgaste de $1,336 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $6,654 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C6, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE F – AMOSTRA C6.

4.1.7. Amostra C7

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C7, é de apenas 3%, pelo que uma tão reduzida variação de humidade relativa não influencia os futuros resultados que advirão dos ensaios tribológicos.

As curvas de atrito são o resultado proveniente dos ensaios tribológicos e fornecem dados capazes de permitir a determinação do coeficiente de atrito médio. A determinação do volume do quarteto das pistas de desgaste de cada amostra, correlacionado com a severidade do ensaio correspondente, permite calcular a taxa específica de desgaste, correspondente a cada amostra e respetivo contra corpo e encontram-se descritos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste da amostra C7 e do contra corpo CC7

Ensaio	COF_m	ΔCOF	$k_C \text{ (mm}^3/\text{N}\cdot\text{m)}$	$k_{CC} \text{ (mm}^3/\text{N}\cdot\text{m)}$
E – 1	0,270	0,037	$4,088 \cdot 10^{-8}$	$2,029 \cdot 10^{-8}$
E – 2	0,252	0,035		
E – 3	0,271	0,096		
E – 4	0,286	0,083		

Através da análise da tabela anterior, é possível afirmar que o coeficiente de atrito varia muito pouco com o aumento de carga aplicada. O ensaio E – 2 apresenta o menor

coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,252. Quanto aos ensaios E – 1 e E – 3, os coeficientes de atrito médio são praticamente iguais, fixando-se em 0,270 e 0,271. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o coeficiente de atrito médio mais elevado do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixa em 0,286. O coeficiente de atrito médio da amostra C7 é de 0,270.

Quanto à taxa específica de desgaste, relativa à amostra C7, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio, aplica-se uma regressão linear, cujo declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C7 possui uma taxa específica de desgaste de $4,088 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $2,029 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Uma análise mais completa e aprofundada à amostra C7, sustentada com recurso a tabelas e gráficos ilustrativos do anteriormente descrito, encontra-se no APÊNDICE G – AMOSTRA C7.

4.1.8. Comparação do Comportamento dos Ensaios

4.1.8.1. E - 1

Para facilitar a análise e interpretação do modo como varia o coeficiente de atrito médio, é apresentado na Figura 4.5 um gráfico que o concatena e representa, assim como a sua variação, para as sete amostras, no ensaio E – 1 (carga normal de 17N e distância de deslizamento de 500 metros).

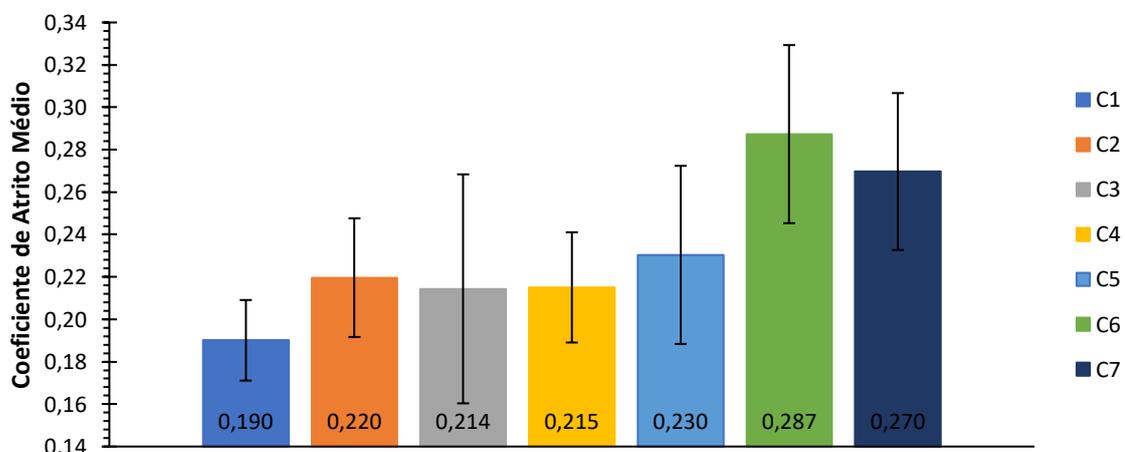


Figura 4.5. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 1 nas diferentes amostras

4.1.8.2. E - 2

Para facilitar a análise e interpretação do modo como varia o coeficiente de atrito médio, é apresentado na Figura 4.6 um gráfico que o concatena e representa, assim como a sua variação, para as sete amostras, no ensaio E – 2 (carga normal de 23N e distância de deslizamento de 500 metros).

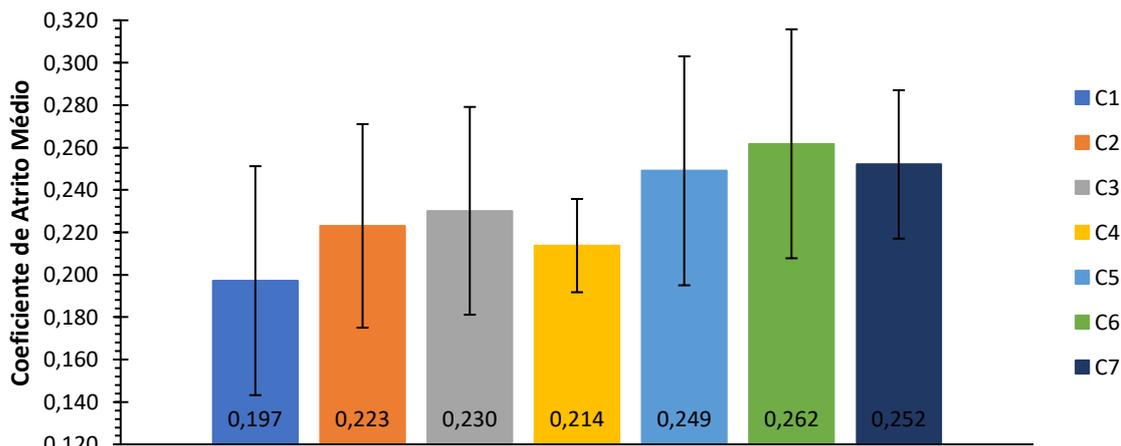


Figura 4.6. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 2 nas diferentes amostras

4.1.8.3. E - 3

Para facilitar a análise e interpretação do modo como varia o coeficiente de atrito médio, é apresentado na Figura 4.7 um gráfico que o concatena e representa, assim como a sua variação, para as sete amostras, no ensaio E – 3 (carga normal de 23N e distância de deslizamento de 800 metros).

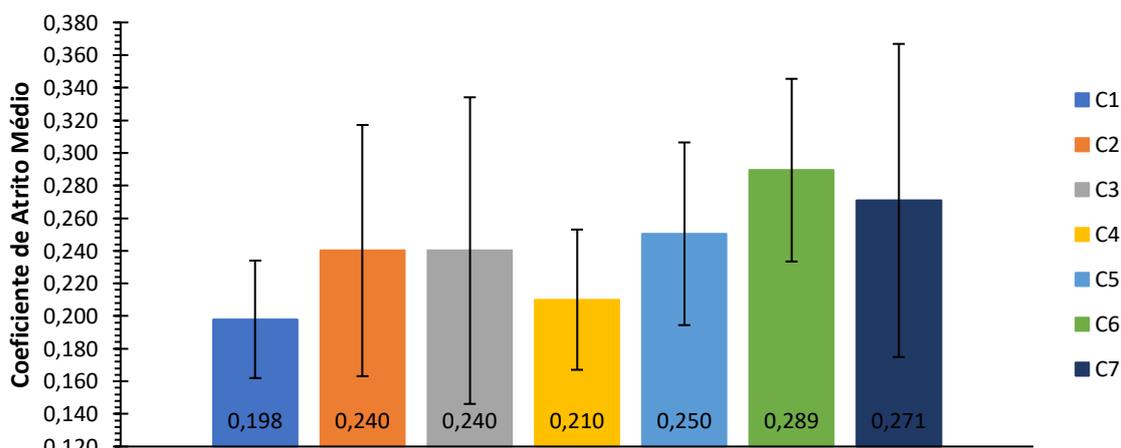


Figura 4.7. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 3 nas diferentes amostras

4.1.8.4. E - 4

Para facilitar a análise e interpretação do modo como varia o coeficiente de atrito médio, é apresentado na Figura 4.8 um gráfico que o concatena e representa, assim como a sua variação, para as sete amostras, no ensaio E – 4 (carga normal de 28,9N e distância de deslizamento de 500 metros).

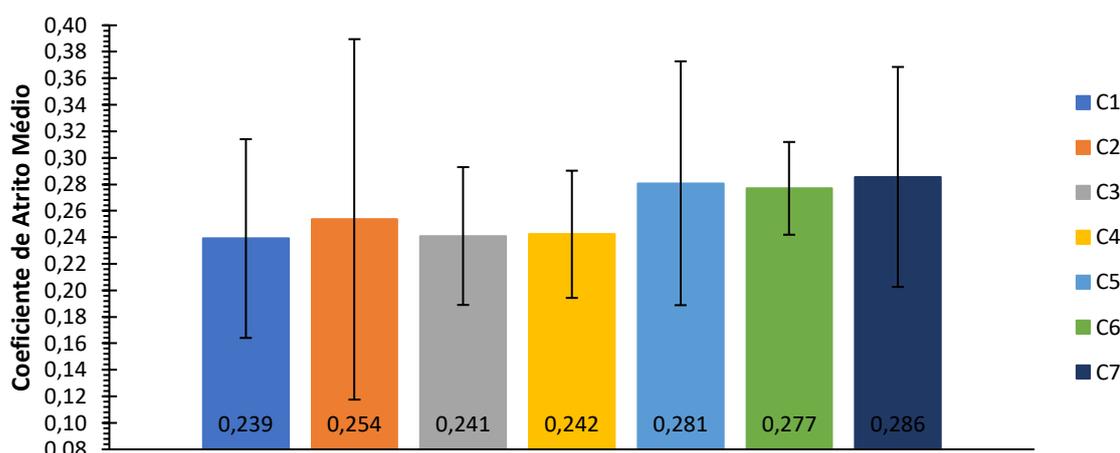


Figura 4.8. Evolução do coeficiente de atrito médio para o ensaio E - 4 nas diferentes amostras

Analisando a evolução dos gráficos das figuras 4.5 à 4.8, é possível concluir que não existe uma correlação direta entre o coeficiente de atrito médio das diferentes amostras, nem intraensaios nem interensaios. Comparando, também, a evolução do coeficiente de atrito médio com o volume da pista de desgaste e com o volume desgastado no contra corpo, verifica-se que também não é possível estabelecer qualquer correlação entre os três resultados obtidos e que as suas evoluções são bem distintas e independentes entre si.

4.1.8.5. Coeficiente de Atrito Médio de Cada Amostra

Na Figura 4.9 encontra-se representado o coeficiente de atrito médio verificado para cada material em estudo.

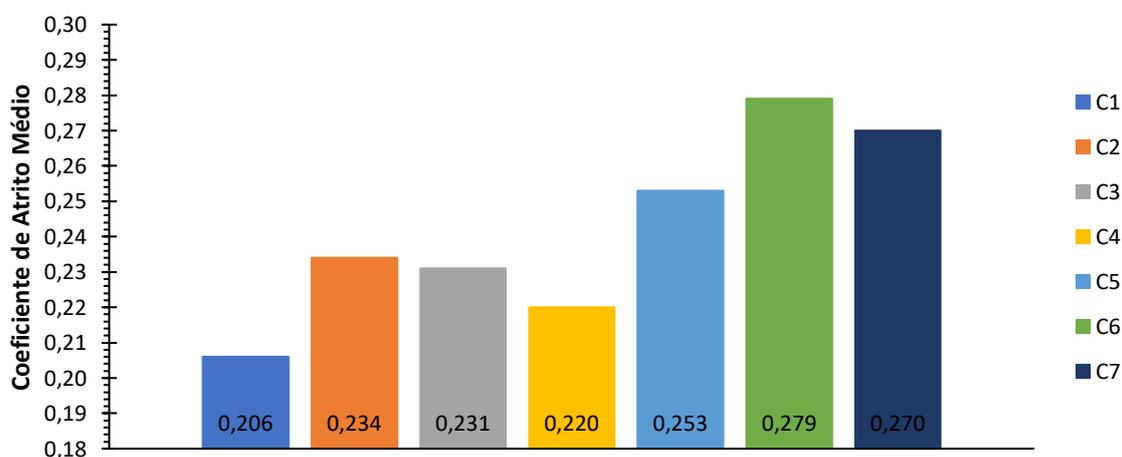


Figura 4.9. Coeficiente de Atrito Médio de cada material em estudo

4.1.8.6. Taxa Específica de Desgaste das Amostras

A taxa específica de desgaste caracteriza como evolui o desgaste, no presente caso, nas amostras. Na Figura 4.10 encontram-se representadas as linhas de tendência que fornecem a taxa específica de desgaste para cada uma das sete amostras, facilitando a sua comparação.

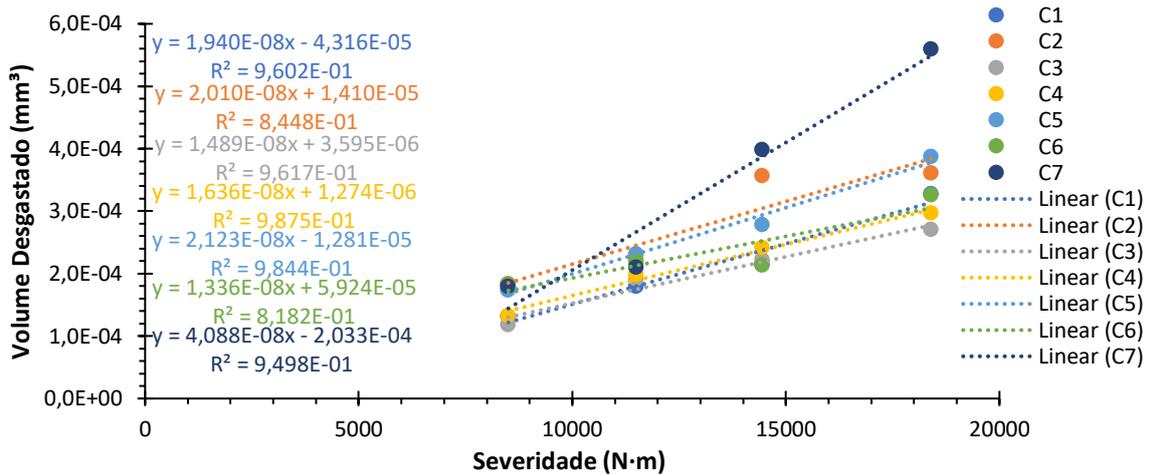


Figura 4.10. Taxa específica de desgaste das diferentes amostras

4.1.8.7. Taxa Específica de Desgaste dos Contra Corpos

A taxa específica de desgaste caracteriza como evolui o desgaste, no presente caso, nos contra corpos. Na Figura 4.11 encontram-se representadas as linhas de tendência que fornecem a taxa específica de desgaste para cada um dos sete contra corpos, facilitando a sua comparação.

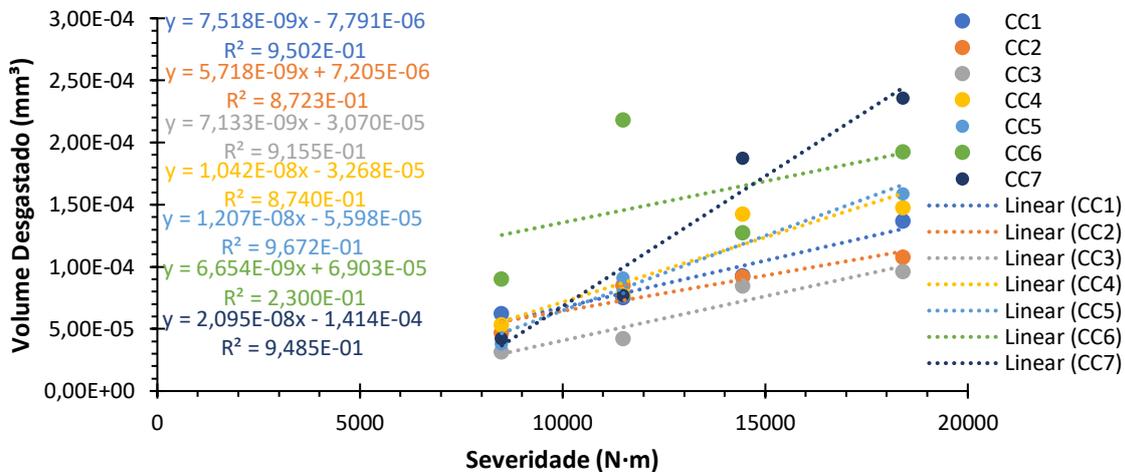


Figura 4.11. Taxa específica de desgaste dos diferentes contra corpos

4.2. Discussão Global de Resultados

O atrito, verificado nos ensaios de deslizamento, depende e varia segundo a rugosidade dos corpos em contacto e interação da rugosidade, da adesão e da perda do comportamento viscoelástico dos materiais.

Os corpos em contacto apresentam rugosidade muito baixa devido ao excelente acabamento superficial a que são submetidos. Então, o desgaste provoca um aumento da rugosidade das superfícies, tanto das amostras como dos contra corpos, conduzindo ao desenvolvimento de atrito.

A interação entre superfícies conduz a deformação elastoplástica das zonas de contacto de ambos os corpos, estando esta deformação intrinsecamente relacionado com as propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e tenacidade à fratura.

No presente estudo, os materiais são soluções sólidas, com estrutura cristalina de WC embebida numa fase ligante, que varia de amostra para amostra. A porção de fase ligante nos materiais em estudo varia entre 8 – 9,4 %pond, sendo o restante material constituído por WC. Contudo, devido à elevada densidade do carboneto de tungsténio, comparativamente com os restantes elementos que compõe a fase ligante, quando se procede à conversão da percentagem em peso da fase ligante para a percentagem em volume, esta aumenta para valores consideravelmente superiores, fixando-se na ordem de 9,8 – 15,3 %vol.

Para que ocorra adesão, é necessário destacar partículas da fase ligante dos materiais e que estas se depositem no corpo que não aquele que lhes deu origem. Esta remoção de material é originada pela deformação plástica dos materiais e pela fratura dos mesmos, correspondendo, respetivamente, às propriedades mecânicas, dureza e tenacidade à fratura. Visto isto, apesar da variação do ligante interferir no atrito e sua evolução, devido à sua presença em quantidades diminutas, especificamente no que à adesão diz respeito, esta surge em pequenas quantidades.

Os compósitos à base de WC são, por natureza, materiais rígidos elásticos sem comportamento viscoso, ou seja, são materiais que apresentam comportamento frágil. Logo, não se verifica, perda de comportamento viscoelástico, pois os mesmos não possuem essa característica.

Assim, com o anteriormente referido, as propriedades mecânicas, dos compósitos de WC, que maior influência apresentam no desgaste por deslizamento são: módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura.

Expostos todos os resultados obtidos é necessário analisar e discuti-los, bem como correlacionar os mesmos com as propriedades mecânicas dos materiais em estudo.

Iniciando a discussão pelo coeficiente de atrito médio, de modo a determinar a sua dependência das propriedades mecânicas dos materiais em estudo, foi realizada uma análise ANOVA. Essa mesma análise demonstrou que o coeficiente de atrito médio apresenta dependência das propriedades mecânicas anteriormente identificadas como sendo as variáveis mais importantes, no que ao desgaste diz respeito: o módulo de elasticidade, a dureza e a tenacidade, bem como variáveis compostas como o quociente entre a tenacidade e o módulo de elasticidade. Apesar de todas as variáveis anteriormente enumeradas serem estatisticamente representativas do coeficiente de atrito médio, nem todas apresentam correlações diretas e explícitas.

O módulo de elasticidade tem como definição a capacidade de determinado material se deformar elasticamente, quando solicitado por uma força de tração compressão, sem que este entre no regime plástico. Durante o movimento relativo de dois corpos em contacto, verifica-se deformação elástica de ambos, pelo que é de esperar que o módulo de elasticidade possua influência no coeficiente de atrito médio e no modo com este evolui.

Tendo construído graficamente a representação do coeficiente de atrito médio de cada material em função do módulo de elasticidade que lhe é respetivo, obteve-se o gráfico presente na Figura 4.12, como sendo uma dispersão de pontos que não apresenta uma tendência clara e direta de correlação do coeficiente de atrito médio com o módulo de elasticidade. Logo, embora o módulo de elasticidade seja uma variável estatisticamente representativa do coeficiente de atrito médio, não se verifica uma correlação explícita entre ambos.

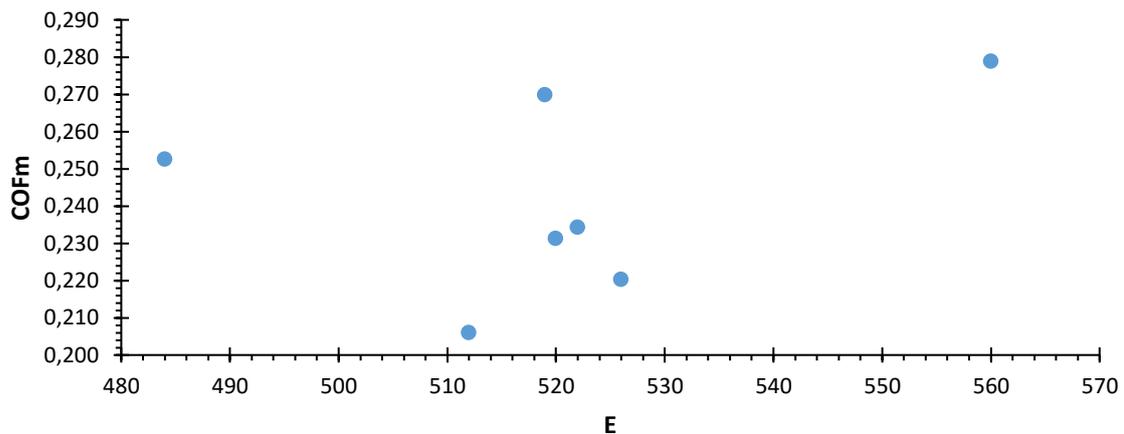


Figura 4.12. Gráfico da correlação entre COFm e E

A dureza é a propriedade mecânica que avalia a resistência de determinado material à deformação plástica. Os carbonetos de tungstênio apresentam valores de dureza elevados. Durante a realização de ensaios de escorregamento, ocorre desgaste em ambos os corpos em contacto, pelo que, para além de deformação elástica ocorre deformação plástica, a dureza influencia o modo como o desgaste ocorre e evolui, influenciando, conseqüentemente, o coeficiente de atrito médio.

Efetuada uma representação gráfica do coeficiente de atrito médio de cada material em função da dureza, tal como verificado para o módulo de elasticidade, obteve-se o gráfico presente na , como sendo uma dispersão de pontos que não apresenta uma correlação direta e inequívoca de uma evolução segundo uma tendência clara. Logo, embora a dureza seja uma variável estatisticamente representativa do coeficiente de atrito médio, não se verifica uma correlação explícita entre ambos.

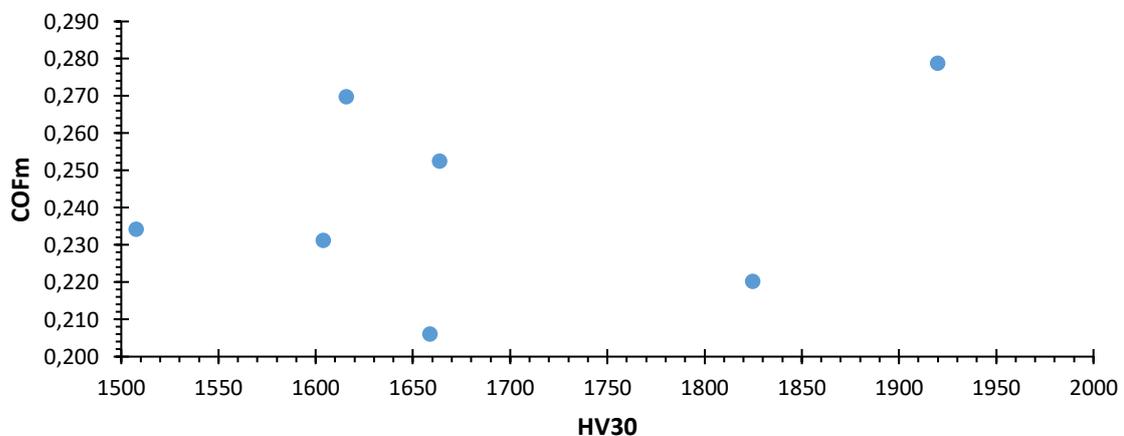


Figura 4.13. Gráfico da correlação entre COFm e HV30

Por fim, a última propriedade mecânica que apresenta relevância no desgaste é a tenacidade à fratura. A tenacidade à fratura é a capacidade, de um determinado material, resistir à propagação de fissuras, pré-existentes, no domínio elástico. O metal duro apresenta valores de tenacidade à fratura baixos. Aquando da evolução do desgaste, devido à deformação elástica e plástica, formam-se microfaturas, que desempenham um papel importante no comportamento do desgaste.

Mais uma vez, construindo uma representação gráfica do coeficiente de atrito médio, verificado para cada material, em função da tenacidade à fratura verifica-se uma clara evolução negativa do coeficiente de atrito médio com o aumento da tenacidade à fratura dos materiais estudados, estando representado na Figura 4.14.

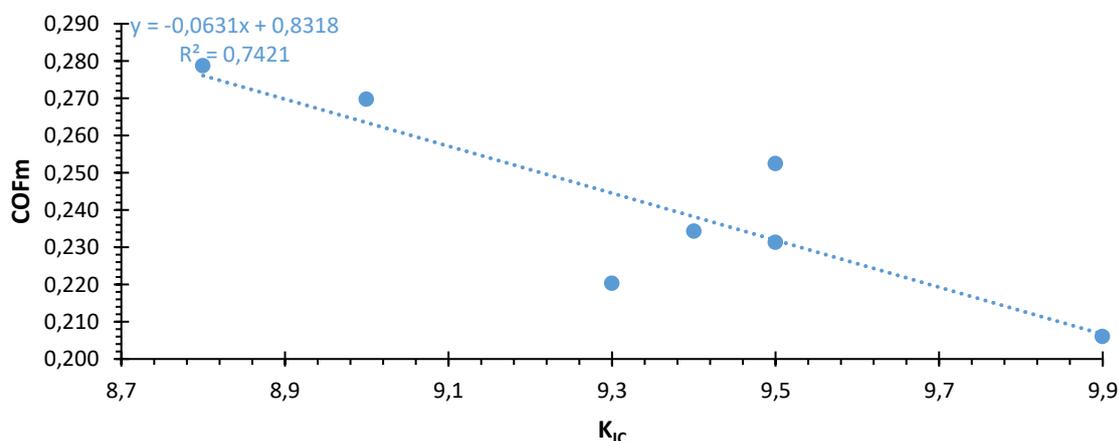


Figura 4.14. Gráfico da correlação entre COF_m e K_{IC}

Esta evolução rege-se por uma tendência do tipo linear, com declive negativo, ou seja, quanto maior for a tenacidade à fratura, menor o coeficiente de atrito médio. Um modelo de previsão do coeficiente de atrito médio é demonstrado na equação (4.1).

$$COF_m = -0,0631 \times K_{IC} + 0,8318 \quad (4.1)$$

Então, existindo uma correlação direta e inequívoca entre o coeficiente de atrito médio de cada amostra e a tenacidade à fratura, é possível construir uma variável composta pela tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade e avaliar se existe uma correlação entre o coeficiente de atrito médio e esta variável composta. É possível agregar estas duas variáveis uma vez que ambas caracterizam processos mecânicos que ocorrem no domínio elástico dos materiais.

Procedendo à construção de uma representação gráfica de uma dispersão de pontos, observa-se, tal como no caso anterior, uma relação direta e explícita entre a

propriedade tribológica em estudo e a variável composta pelo quociente entre a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade, representado na Figura 4.15.

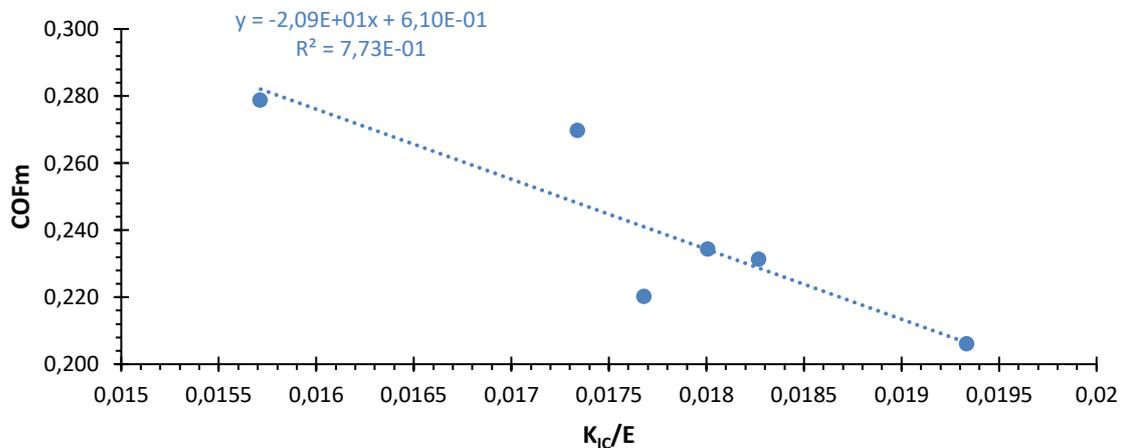


Figura 4.15. Gráfico da correlação entre COF_m e K_{IC}/E

Tal como na situação anterior, esta evolução rege-se por uma tendência do tipo linear, com declive negativo, ou seja, quanto maior for a variável composta, menor o coeficiente de atrito médio. Um modelo de previsão do coeficiente de atrito médio é demonstrado na equação (4.2).

$$COF_m = -20,886 \times \frac{K_{IC}}{E} + 0,610 \quad (4.2)$$

Este modelo, por apresentar um coeficiente de determinação superior ao da equação (4.1), apresenta-se como uma melhor expressão geradora de estimativas para o coeficiente de atrito médio, o que também permite afirmar que o quociente entre a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade é propriedade que melhor caracteriza a evolução do coeficiente de atrito médio.

Quanto à taxa específica de desgaste, efetuando uma análise ANOVA, semelhante à realizada para o coeficiente de atrito médio, com a finalidade de aferir a relevância estatística das variáveis módulo de elasticidade, dureza e tenacidade à fratura, sem descartar a variável composta constituída pelo quociente entre a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade, verificou-se que todas possuem relevância estatística e que, por conseguinte, influenciam a taxa específica de desgaste e a sua evolução.

Seguindo a métrica utilizada na discussão do coeficiente de atrito médio, ou seja, iniciando a análise por uma representação gráfica da taxa específica de desgaste, verificada para cada material, em função do módulo de elasticidade, verifica-se uma clara evolução

negativa da taxa específica de desgaste com o aumento do módulo de elasticidade dos materiais estudados. Contudo, a taxa específica de desgaste da amostra C7, com fase ligante constituída por NiCrMo, por ser muito superior às demais, destaca-se da dispersão de pontos das restantes amostras, sugerindo que este pode não ser um valor totalmente correto. Visto isto, se a amostra C7 for excluída desta análise, a evolução obtida rege-se por uma tendência do tipo linear, com declive negativo, ou seja, quanto maior for o módulo de elasticidade, menor a taxa específica de desgaste, tal como demonstra o gráfico presente na Figura 4.16.

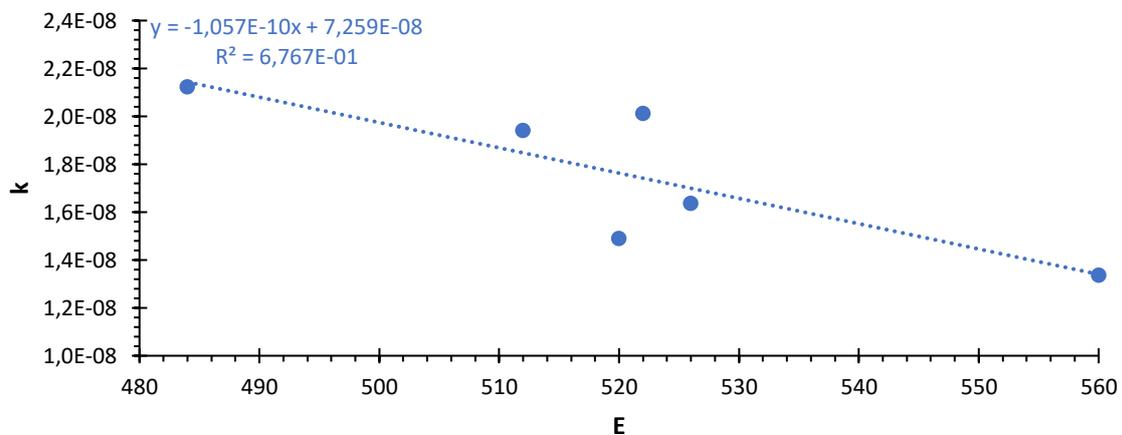


Figura 4.16. Gráfico da correlação entre k e E

Um modelo de previsão da taxa específica de desgaste é demonstrado na equação (4.3).

$$k = -1,057 \cdot 10^{-10} \times E - 7,259 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \quad (4.3)$$

Relativamente à dureza, mais uma vez, efetuando uma representação gráfica da taxa específica de desgaste, de cada material, em função da dureza, obteve-se o gráfico presente na Figura 4.17, como sendo uma dispersão de pontos que não apresenta uma correlação direta e inequívoca de uma evolução segundo uma tendência clara. Logo, embora a dureza seja uma variável estatisticamente representativa da taxa específica de desgaste, não se verifica uma correlação explícita entre ambas.

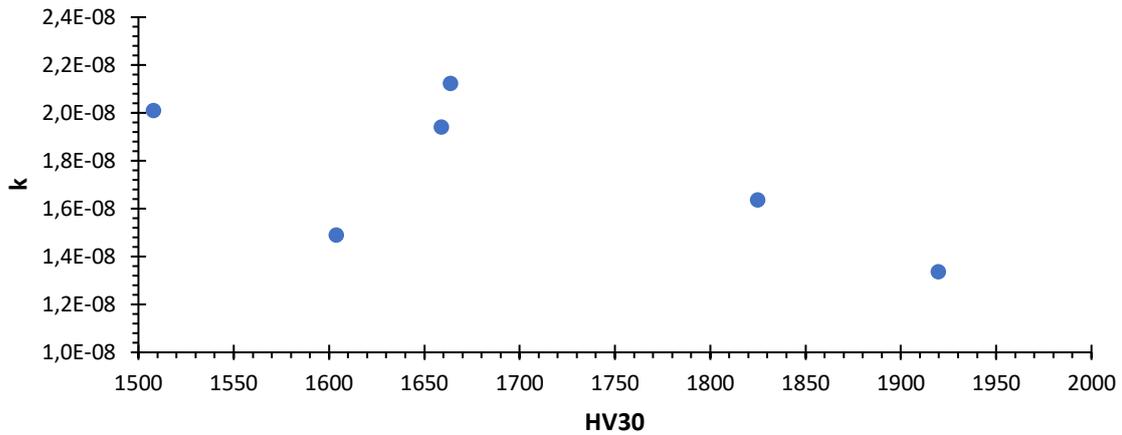


Figura 4.17. Gráfico da correlação entre k e HV30

Quanto à tenacidade à fratura, projetando uma representação gráfica da taxa específica de desgaste, verificada para cada material, em função da tenacidade à fratura, obteve-se o gráfico presente na figura , como sendo uma dispersão de pontos que não apresenta uma tendência clara e direta de correlação da taxa específica de desgaste com a tenacidade à fratura. Logo, embora esta propriedade mecânica seja uma variável estatisticamente representativa da taxa específica de desgaste, não se verifica uma correlação explícita entre ambas.

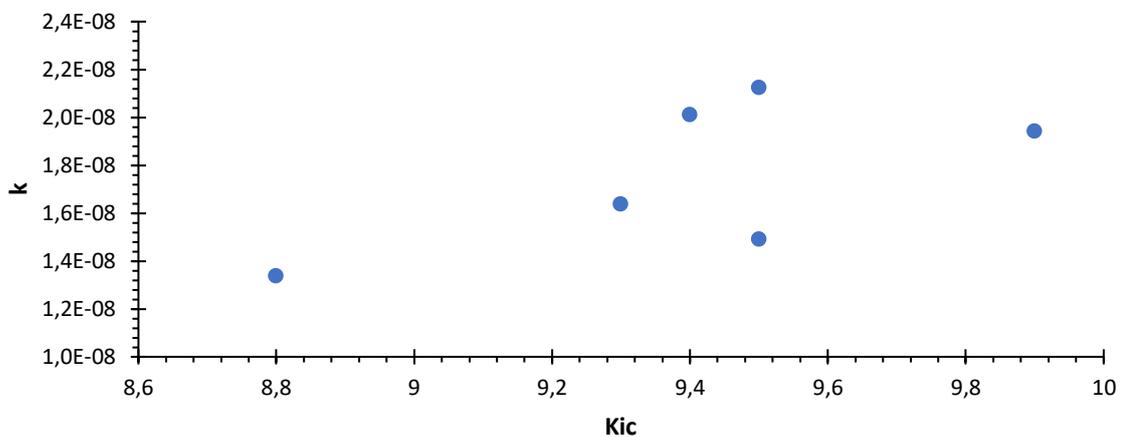


Figura 4.18. Gráfico da correlação entre k e K_{1C}

Por fim, surge a variável composta. Procedendo à construção de uma representação gráfica de uma dispersão de pontos, observa-se, tal como no caso do módulo de elasticidade, uma relação direta e explícita entre a propriedade tribológica em estudo e a variável composta pelo quociente entre a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade. Mais uma vez, a taxa específica de desgaste da amostra C7, com fase ligante constituída por NiCrMo, por ser muito superior às demais, destaca-se da dispersão de pontos das restantes

amostras, sugerindo que este pode não ser um valor totalmente correto. Visto isto, se a amostra C7 for excluída desta análise, a evolução rege-se por uma tendência do tipo linear, com declive positivo, ou seja, quanto maior for a variável composta, maior a taxa específica de desgaste, representado na Figura 4.19.

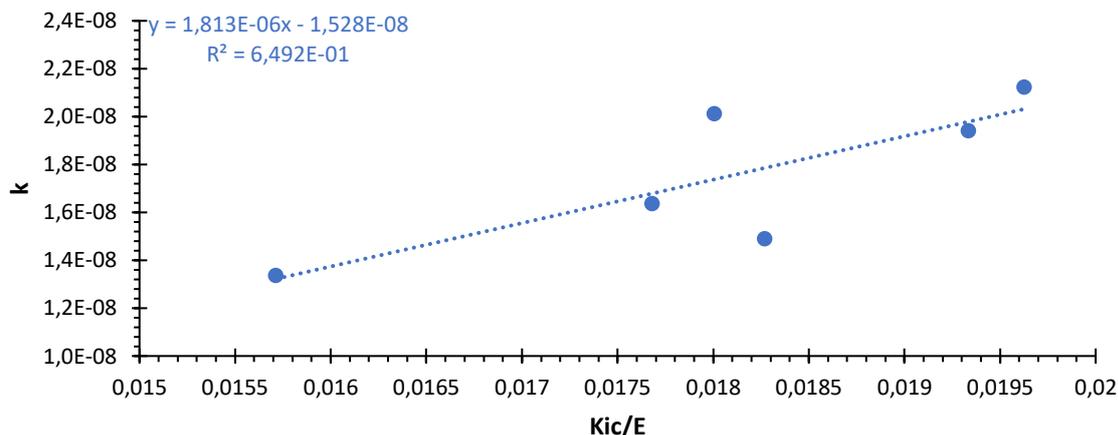


Figura 4.19. Gráfico da correlação entre k e K_{IC}/E

Um modelo de previsão da taxa específica de desgaste é demonstrado na equação (4.4).

$$k = 1,813 \cdot 10^{-6} \times \frac{K_{IC}}{E} - 1,528 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \quad (4.4)$$

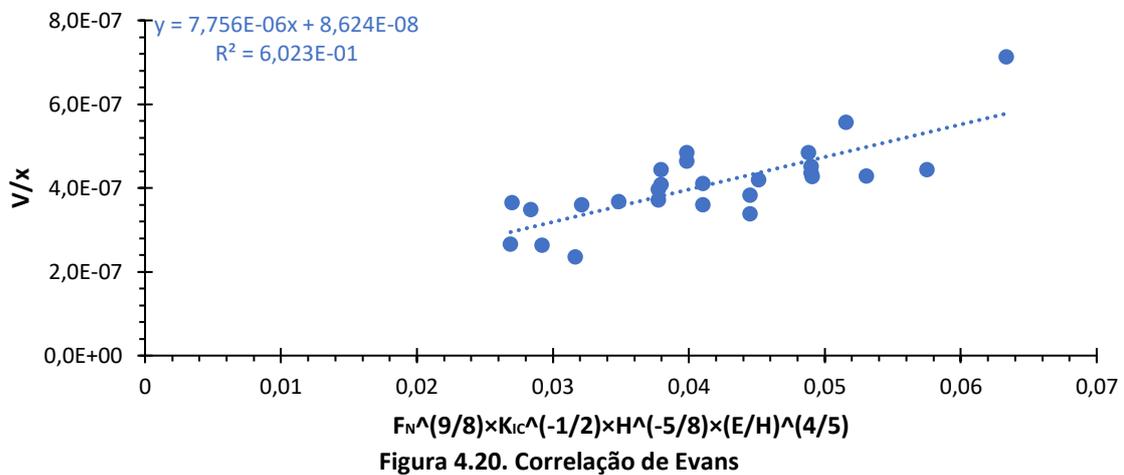
Este modelo, por apresentar um coeficiente de determinação inferior ao da equação(4.3), faz do modelo do módulo de elasticidade como uma melhor expressão geradora de estimativas para a taxa específica de desgaste, o que também permite afirmar que o módulo de elasticidade é propriedade que melhor caracteriza a evolução do coeficiente de atrito médio.

Embora a discussão relativa à taxa específica de desgaste estabeleça a relação entre as propriedades tribológicas, obtidas ao longo do presente estudo, com as propriedades mecânicas dos materiais, apresenta uma falha capital. Atendendo à expressão matemática (3.7), formulada por Archard, é possível concluir que a taxa específica de desgaste depende do volume desgastado, da distância de deslizamento e da carga aplicada no contacto. Ora, na discussão até ao momento realizada, não foi estabelecida qualquer relação entre a taxa específica de desgaste e as variáveis carga aplicada e distância de deslizamento. Então, surge a necessidade de incluir estas duas variáveis na discussão.

De modo a estabelecer uma relação entre as propriedades tribológicas, anteriormente descritas, com as propriedades mecânicas das amostras em estudo, é aplicada

a correlação de Evans (23), tal como apresentado anteriormente. Essa correlação estabelece uma ligação entre o quociente do volume da pista de desgaste de cada ensaio e a distância de deslizamento com a carga aplicada, com o módulo de elasticidade, assim como com a tenacidade à fratura e a dureza, de cada material.

A relação entre estas propriedades é aferida através da linha de tendência, presente no gráfico da Figura 4.20, do quociente entre o volume desgastado e a distância de realização de cada ensaio em função da correlação de Evans. Posteriormente, aplica-se uma regressão linear a esse mesmo gráfico, em que o seu declive é a constante que permite construir uma relação matemática capaz de auxiliar a previsão analítica do comportamento ao desgaste de determinada amostra, para as condições ensaiadas.



Através do gráfico presente na figura anterior é possível escrever a equação (4.5).

$$\frac{V}{x} = w_E \times F_N^{\frac{9}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (4.5)$$

Efetuada a substituição da equação de Czichos (3.8) é possível escrever a equação (4.6). Essa equação permite prever a taxa específica de desgaste de cada material segundo as suas propriedades mecânicas, independentemente da severidade.

$$k = w_E \times F_N^{\frac{1}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (4.6)$$

$$k = 7,756 \cdot 10^{-6} \times F_N^{\frac{1}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$$

Na análise SEM, à qual foram submetidas todas as amostras, observa-se a deposição do material desgastado e o tipo de desgaste ocorrido em cada pista de desgaste.

Esta análise, sugere que o tipo de desgaste, verificado na totalidade das pistas de desgaste, é homogêneo e semelhante na globalidade das amostras analisadas. Verifica-se, tal como demonstra a Figura 4.21 a), deposição de material, não compactado e de fina granulometria, nos rebordos da pista de desgaste, Figura 4.21 b), e formação de um tribofilme, na pista de desgaste, sendo este compactado e apresentando propriedades mecânicas e tribológicas diferentes do material depositado na periferia da pista de desgaste e daquele que lhe deu origem, Figura 4.21 c) e d).

O material depositado na periferia não desempenha um papel relevante no sistema de desgaste, já o tribofilme, por estar depositado na região onde ocorre deslizamento, apresenta um papel relevante no modo como esse mesmo desgaste ocorre. Desconhece-se se este promove lubrificação no sentido de promover coeficientes de atrito mais baixos ou se, por outro lado, favorece um aumento da taxa específica de desgaste. Contudo, verifica-se variação do volume de tribofilme formado interamostras, sugerindo que para amostras desprovidas de carbonetos na sua fase ligante, a tendência de formação de tribofilme, em quantidade, é menor.

Na Figura 4.21 d) é possível visualizar o plano preferencial de deslizamento, assim como a ocorrência de lavragem. Todas as pistas de desgaste apresentam este comportamento, umas de forma mais pronunciada do que outras – em pistas com maior volume de material desgastado torna-se mais evidente.

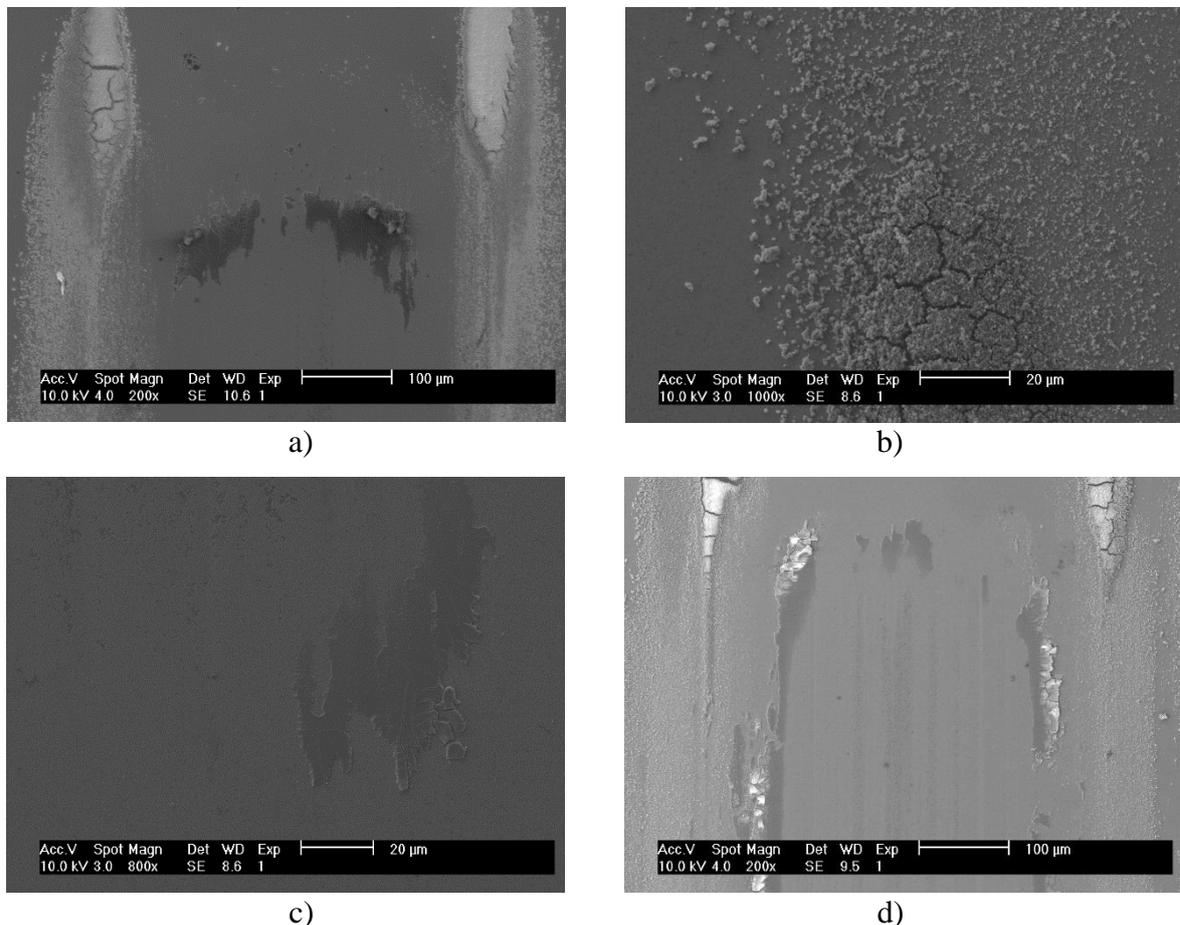


Figura 4.21. Fotografias retiradas por SEM. a) Pista de desgaste; b) material depositado na periferia da pista de desgaste; c) tribofilme depositado na pista de desgaste da amostra C3; d) tribofilme depositado na pista de desgaste da amostra C6.

Relativamente à análise dos contra corpos, esta sugere que o tipo de desgaste, verificado na totalidade dos contra corpos, é homogéneo e semelhante entre todos. Verifica-se, tal como demonstra a Figura 4.22 deposição de material, não compactado e de fina granulometria, nos rebordos da calota desgastada, Figura 4.22 a) e b), bem como formação de uma película adesiva, por baixo do material não compactado, Figura 4.22 c) e d).

O material depositado na periferia não desempenha um papel relevante no sistema de desgaste, já o material depositado por adesão pode ter origem nas condições de ensaio, sendo a sua quantidade influenciada pelas propriedades mecânicas das amostras.

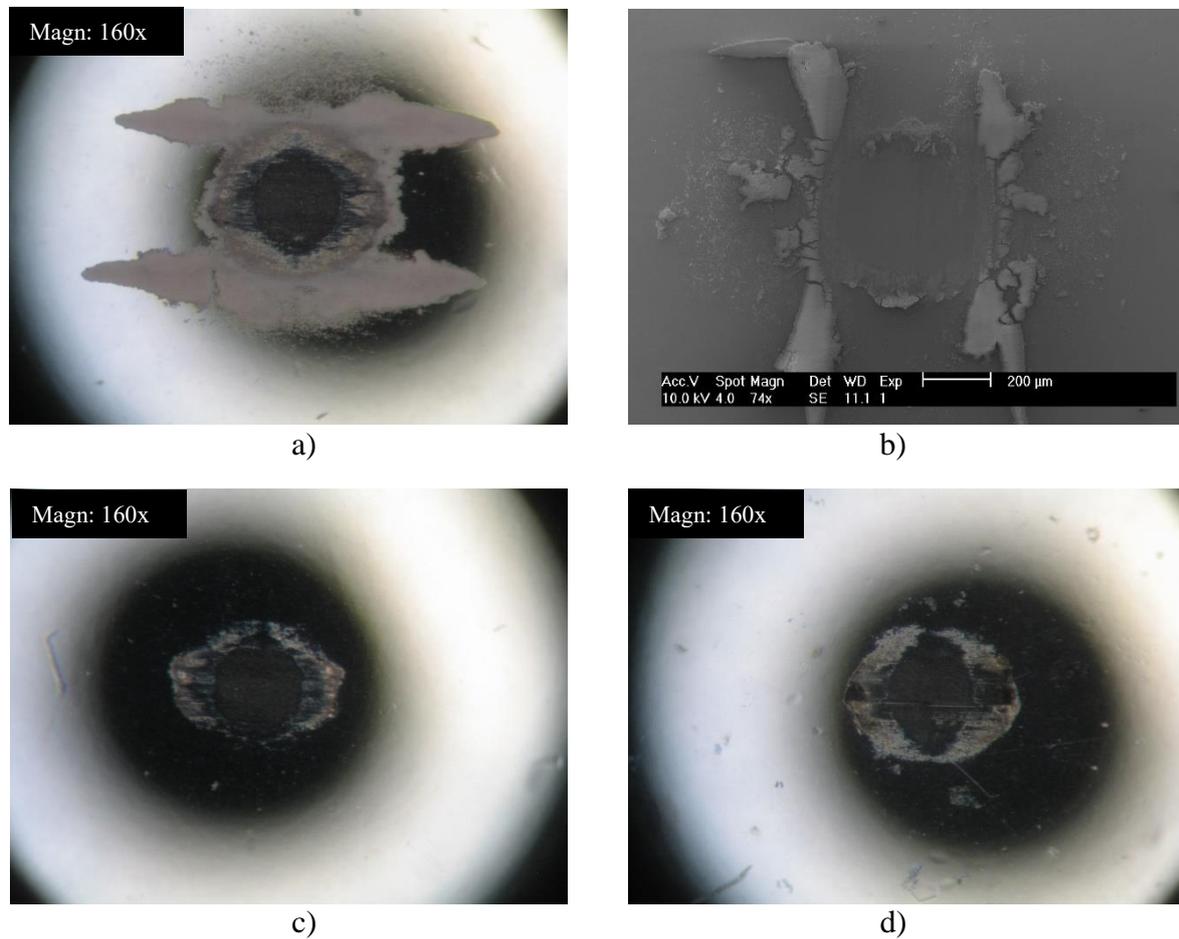


Figura 4.22. Fotografias do contra corpo. a) Contra corpo por limpar; b) Contra corpo por limpar observado no SEM; c) Material depositado por adesão na periferia da calota desgastada do contra corpo C3; d) Material depositado por adesão na periferia da calota desgastada do contra corpo C6.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de investigação, que constitui a dissertação de mestrado apresentada, destinou-se a analisar o comportamento das propriedades tribológicas de vários carbonetos sinterizados com diferentes fases ligantes. Após a demonstração dos resultados obtidos e sua respetiva discussão, surge agora a necessidade de apresentar as conclusões obtidas.

Coefficiente de Atrito

- O coeficiente de atrito é independente da distância de deslizamento, excetuando o pequeno efeito de rodagem inicial;
- O coeficiente de atrito depende da carga normal aplicada no contacto;
- A humidade relativa do ar influencia o comportamento e evolução da curva de atrito;
- O coeficiente de atrito médio não se correlaciona com o volume de material desgastado, nem, conseqüentemente, com a taxa específica de desgaste;
- Amostras com carbonetos na sua fase ligante apresentam maiores coeficientes de atrito médio, com exceção da amostra C4;
- Conseqüentemente, amostras sem a presença de carbonetos na sua fase ligante apresentam menores coeficientes de atrito;
- A variação da fase ligante leva a que o coeficiente de atrito médio varie entre 0,2 e 0,3;
- A amostra C1, constituída por carboneto de tungsténio com fase ligante de Co, apresenta o menor coeficiente de atrito médio;
- A amostra C6, constituída por carboneto de tungsténio com fase ligante de CoNiCr, apresenta o maior coeficiente de atrito médio;
- O coeficiente de atrito médio é tanto menor quanto maior for a tenacidade à fratura;
- O coeficiente de atrito médio é tanto menor quanto maior for o quociente entre a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade;

Taxa Específica de Desgaste

- Quanto maior for a severidade, maior a profundidade das pistas de desgaste e, conseqüentemente, o volume de material desgastado, tanto nas amostras, como nos contra corpos, acompanha o aumento da severidade, corroborando a expressão de Archard;
- Comparando a taxa específica de desgaste de todos os provetes, a amostra C7, constituída por uma fase ligante de NiCrMo, é a que apresenta um valor mais elevado;
- Comparando a taxa específica de desgaste de todos os provetes, a amostra C6, constituída por uma fase ligante de CoNiCr, é a que apresenta um menor valor;
- Para os sete pares de materiais estudados, a expressão matemática

$$k = 7,756 \cdot 10^{-6} \times F_N^{\frac{1}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \text{ mm}^3 / N \cdot m$$

afigura-se como sendo uma boa expressão geradora de estimativas para a taxa específica de desgaste k dos materiais que constituem as amostras;

- A taxa específica de desgaste dos contra corpos varia consoante o materiais que constituem as amostras;
- Comparando a taxa específica de desgaste de todos os contra corpos, o contra corpo em contacto com a amostra C7, constituída por uma fase ligante de NiCrMo, é a que apresenta um valor mais elevado;
- Comparando a taxa específica de desgaste de todos os contra corpos, o contra corpo em contacto com a amostra C6, constituída por uma fase ligante de CoNiCr, é a que apresenta um menor valor.

Microscopia

- Amostras com maior taxa específica de desgaste apresentam maior quantidade de material proveniente do desgaste na área envolvente ao contacto;
- Amostras que contenham carbonetos na sua fase ligante apresentam tribofilmes em maiores quantidades;
- A adesão de material no contra corpo varia com a severidade e com as propriedades mecânicas das amostras.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

O objetivo do presente trabalho foi alcançado: caracterização tribológica de diversos carbonetos de tungstênio constituídos por diferentes fases ligantes. Caracterização tribológica refere-se, essencialmente, à avaliação do coeficiente de atrito observado no contato e da taxa específica de desgaste, tanto das amostras estudadas, bem como do seu respectivo contra corpo.

Contudo, esta dissertação, gera algumas questões acerca do comportamento do sistema de desgaste e como este varia com o ambiente em seu redor. Devido ao anteriormente referido, sugere-se num trabalho futuro:

- Realizar os mesmos ensaios tribológicos, com os mesmos procedimentos experimentais e mantendo as variáveis de controlo, mas controlando, durante a realização dos mesmos, a humidade relativa do ar e averiguar como o par tribológico se comporta para diferentes humidades relativas;
- Estudar a influência da lubrificação no atrito e desgaste, considerando, por exemplo, meios imersos;
- Compreender como evolui a quantidade de material depositado, no contra corpo, por adesão, tendo em consideração a severidade dos ensaios tribológicos, bem como as propriedades mecânicas das amostras em estudo;
- Estudar a formação e deposição/aglomeração do tribofilme;
- Estudar as propriedades mecânicas e tribológicas do tribofilme, bem como a sua influência no atrito e desgaste;
- Realizar o mesmo estudo com um contra corpo diverso, constituído, por exemplo, por carboneto de silício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Santhanam AT, Tierney P, Hunt JL. Metals Handbook, Cemented Carbides, 10th Ed. Vol. 2. 1990.
- [2]. Deng J, Liu L, Yang X, Liu J, Sun J, Zhao J. Materials and Design. 2007;28(3):757.
- [3]. Vilhena LM, Fernandes CM, Soares E, Sacramento J, Senos AMR, Ramalho A. Abrasive wear resistance of WC-Co and WC-AISI 304 composites by ball-cratering method. Wear. 2016;346–347:99–107.
- [4]. Fernandes CM, Vilhena LM, Pinho CMS, Oliveira FJ, Soares E, Sacramento J, et al. Mechanical characterization of WC-10wt% AISI 304 cemented carbides. Mater Sci Eng A. 2014;618:629–36.
- [5]. Bailey SG, Perrott CM. Wear processes exhibited by WC-Co rotary cutters in mining. Wear. 1974 Jul 1;29(1):117–28.
- [6]. Conrad H, McCabe D, Sargent GA. Effects of Microstructure on the Erosion of WC-Co Alloys. In: Science of Hard Materials. 1983. p. 775–96.
- [7]. Wright IG, Shetty DK, Clauer AH. Slurry erosion WC-Co cermets and its relationship to material properties. In: Proc. 6th Int. Conf. on erosion liquid and solid impact. 1983. 1–8 p.
- [8]. Larsen-Basse J. Binder extrusion in sliding wear of WC-Co alloys. 1985;105:247–56.
- [9]. Larsen-Basse J. Effect of Composition, Microstructure, and Service Conditions on the Wear of Cemented Carbides. 1983;35(11):35–42.
- [10]. Quercia G, Grigorescu I, Contreras H, Di Rauso C, Gutiérrez-Campos D. Friction and wear behavior of several hard materials. In 2001. p. 359–69.
- [11]. Yuan J, Zhu Y, Zheng X, Ruan Q, Ji H. Improvement in tribological properties of atmospheric plasma-sprayed WC-Co coating followed by Cu electrochemical impregnation. 2009;255(18):7959–65.
- [12]. Gille G, Szesny B, Dreyer K, Van Den Berg H, Schmidt J, Gestrich T, et al. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. 2002;20:3–22.

- [13]. Sacks N. The wear and corrosive-wear response of tungsten carbide-cobalt hardmetals under woodcutting and three body abrasion conditions. 2002;145.
- [14]. Czichos H. A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. 1978.
- [15]. Pirso J, Letunovič S, Viljus M. Friction and wear behaviour of cemented carbides. 2004;257:257–65.
- [16]. Engqvist H, Högberg H, Botton GA, Ederyd S, Axén N. Tribofilm formation on cemented carbides in dry sliding conformal contact. 2000;239(2):219–28.
- [17]. Jia K, Fischer TE. Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides. 1997;203–204:310–8.
- [18]. IARC. List of Classifications – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans [Internet]. [cited 2020 Jun 3]. Available from: <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications/>
- [19]. European Commission. Commission Delegated Regulation (Eu) 2020/217. 2019;L44:4.
- [20]. Nanalyse. Investing in the World’s Largest Producer of Cobalt [Internet]. [cited 2020 Jun 4]. Available from: <https://www.nanalyze.com/2018/03/investing-worlds-largest-producer-cobalt/>
- [21]. CRU. Cobalt Market Strategy Support [Internet]. [cited 2020 Jun 8]. Available from: <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/case-studies/cobalt-market-strategy-support/>
- [22]. European Commission. Communication on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU. 2017;1–8.
- [23]. Evans A, Marshall D. Wear mechanisms in ceramics. *Materials, Fundamentals of Friction and Wear of*; 1980.
- [24]. ASTM. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear 1. Lubrication. 2011;05(Reapproved 2010):1–10.
- [25]. Silva R. Desgaste de Materiais Dentários - Estudo da Influência de Diferentes Soluções Abrasivas. 2014.
- [26]. Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology*. 2008.
- [27]. Ramalho A, Miranda JC. The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. *Wear*. 2006;260(4–5):361–7.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

Antes de iniciar todo o processo de realização de ensaios tribológicos, com vista à medição das forças normal e transversal, verificadas durante a realização dos mesmos, para posterior construção das curvas de atrito e consequente determinação do coeficiente de atrito médio, é necessário proceder à calibração das células de carga normal e transversal.

As células de carga são dois sensores digitais, logo o seu comportamento é o comportamento de um sensor comum. Um sensor é um dispositivo eletrónico capaz de ser solicitado, através de um estímulo, e gerar uma resposta, sob a forma de sinal elétrico, que caracteriza o estímulo que o solicitou. Ou seja, o funcionamento de um sensor baseia-se na conversão de determinada quantidade, propriedade ou estado, num sinal elétrico passível de interpretação e tratamento por parte de um determinado programa informático. Posteriormente, o programa informático converte o sinal elétrico recebido do sensor numa resposta quantificada do estímulo.

Neste caso, o tribómetro possui duas células de carga, ou seja, dois sensores, responsáveis por receberem o estímulo e gerar, respetivamente, um sinal elétrico que corresponde à força normal e à força transversal. Esta resposta, de modo a caracterizar fielmente o estímulo, requer calibração, logo, é necessário informar o programa informático de como varia o sinal elétrico em função da solicitação.

A calibração de sensores é feita através de uma lei matemática que dota o programa de uma relação matemática, normalmente constante, capaz de converter o sinal elétrico na quantidade, no presente caso, na força, em newton, verificada, normal e transversalmente, nas amostras. Como o objetivo é calibrar sensores com vista à determinação de cargas/forças verificadas nas amostras a ensaiar, estes são calibrados através da sua solicitação com recurso a massas metálicas.

Na Tabela AA. 1 encontram-se explanadas as massas colocadas em cada célula de carga, a força correspondente, e a voltagem correspondente.

Tabela AA. 1. Solicitação e resposta das células de carga na calibração

Sensor/Célula	M (Kg)	F (N)	ΔV (mV)
Normal	0,0	0,000	0,001
	0,1	0,981	0,035
	0,2	1,962	0,072
	0,3	2,943	0,108
	0,4	3,924	0,144
	0,5	4,905	0,180
	1,0	9,810	0,361
	1,5	14,715	0,542
	2,0	19,620	0,721
	3,0	29,430	1,081
Transversal	0,0	0,000	0,003
	0,1	0,981	0,038
	0,2	1,962	0,068
	0,3	2,943	0,115
	0,4	3,924	0,147
	0,5	4,905	0,198
	0,7	6,867	0,253
	1,7	16,677	0,538

Cada célula de carga, de modo a ser corretamente calibrada, deve ser solicitada com uma carga máxima de calibração superior à carga máxima que irá experimentar durante a realização dos ensaios tribológicos. Posto isto, o ensaio de maior magnitude no que a força normal concerne será de 28,9 N, pelo que a carga máxima de calibração é de 29,430 N. Relativamente à célula de carga transversal, o mesmo se aplica. Logo, a carga máxima de calibração utilizada é de 16,677 N.

A constante de calibração de cada sensor de carga resulta do declive da reta da regressão linear do gráfico de pontos originado pelos dados da tabela anterior. Visto isto, é necessário construir o gráfico ilustrado na Figura AA. 1 que representa a força exercida no sensor em função da diferença de potencial, para as células de carga normal e transversal.

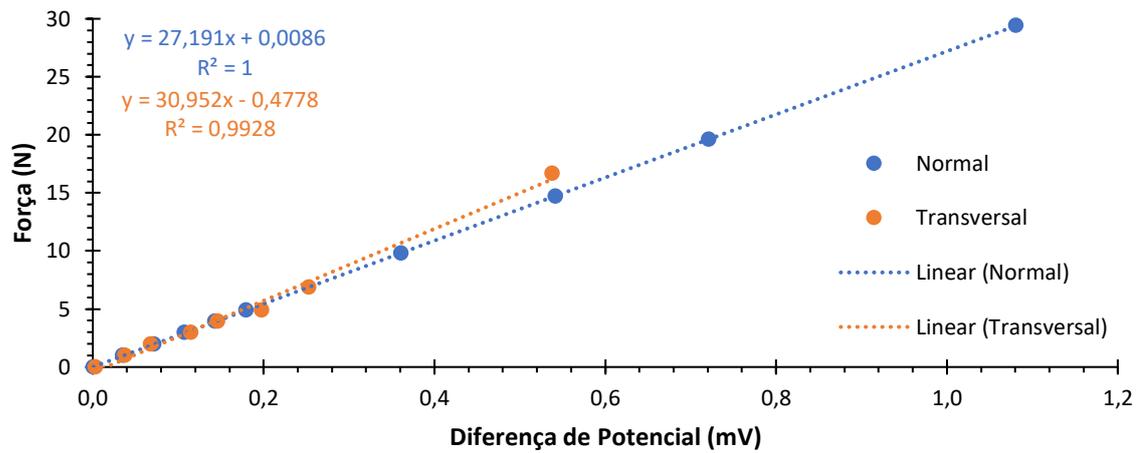


Figura AA. 1. Calibração das células de carga

Através da análise do gráfico presente na figura anterior, é possível afirmar que a constante que calibra a célula de carga normal e a célula de carga transversal é 27,191 N·mV e 30,952 N·mV, respetivamente.

APÊNDICE B – AMOSTRA C2

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AB. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AB. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C2

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	46
E - 2	48
E - 3	54
E - 4	58

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C2, é de 12%.

A realização dos ensaios da amostra C2 sofreram um interregno de, aproximadamente, dois meses na sua realização, sendo que os ensaios E - 1 e E - 2 foram realizados na era pré-pandemia e os restantes ensaios foram realizados após a total paralisação nacional e mundial, deixando a vida em suspenso, incluindo a atividade de investigação.

Na Figura AB. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C2.

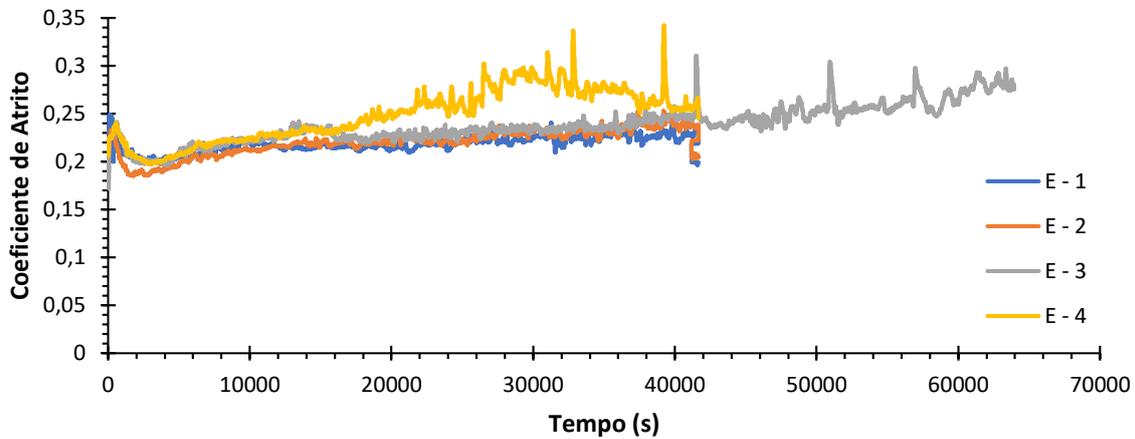


Figura AB. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C2

Verifica-se que, para a carga de menor intensidade, ensaio E – 1, a curva de atrito que lhe corresponde é inferior às demais. Contudo, a curva relativa ao ensaio E – 2 encontra-se muito próxima, apresentando valores semelhantes aos da curva anterior. Já a curva de atrito referente ao ensaio E – 3, demarca-se das anteriores, fixando-se acima das mesmas. Por fim, a curva cuja carga normal é a mais elevada, E – 4, apresenta-se acima das restantes, configurando um maior coeficiente de atrito médio.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AB. 2.

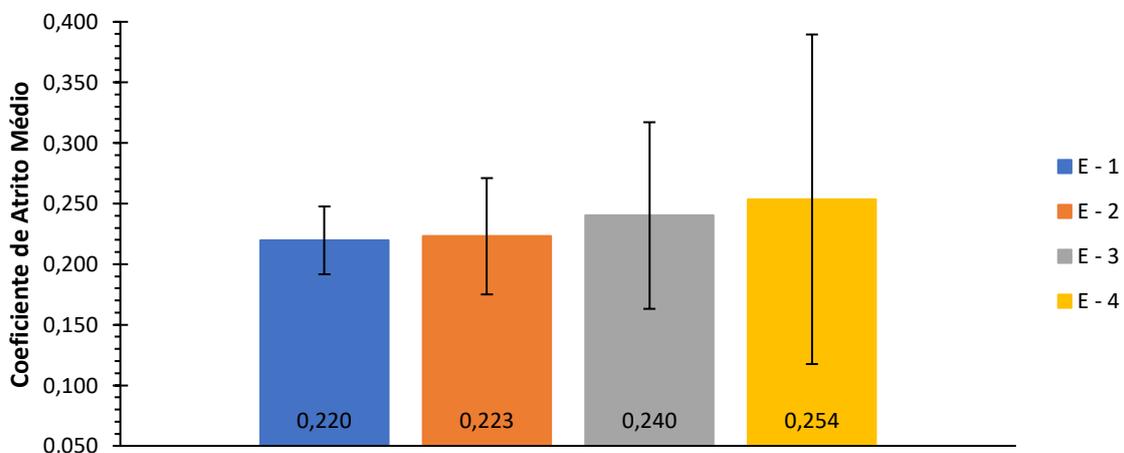


Figura AB. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C2

Tal como referido anteriormente, o ensaio E – 1 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,220. Quanto ao ensaio E – 2, o coeficiente de atrito médio é ligeiramente superior ao ensaio E – 1, fixando-se em 0,223. O ensaio E – 3 apresenta um coeficiente de atrito médio muito superior ao do ensaio E – 2, apresentando um valor de 0,240. Uma vez que é alcançado o regime estacionário, sendo por isso ultrapassado o regime de rodagem, e como, por essa razão, a distância de deslizamento não interfere no coeficiente de atrito, a maior humidade relativa no início da realização do ensaio pode ter despoletado o desenvolvimento de um coeficiente de atrito médio muito superior e completamente díspar daquele verificado no ensaio E – 2. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,254.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C2, encontram-se apresentados na Tabela AB. 2.

Tabela AB. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C2

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,220	0,028
E – 2	0,223	0,048
E – 3	0,240	0,077
E – 4	0,254	0,136

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AB. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AB. 3, bem como a severidade.

Tabela AB. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C2

Ensaio	V _{PD} (mm ³)	Severidade (N·m)
E – 1	1,835 · 10 ⁻⁴	8500
E – 2	2,176 · 10 ⁻⁴	11500
E – 3	3,611 · 10 ⁻⁴	18400
E – 4	3,564 · 10 ⁻⁴	14450

Tal como se pode observar na Tabela AB. 3, o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade, embora os ensaios E – 3 e E – 4 apresentem um volume de desgaste consideravelmente próximo.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AB. 3.

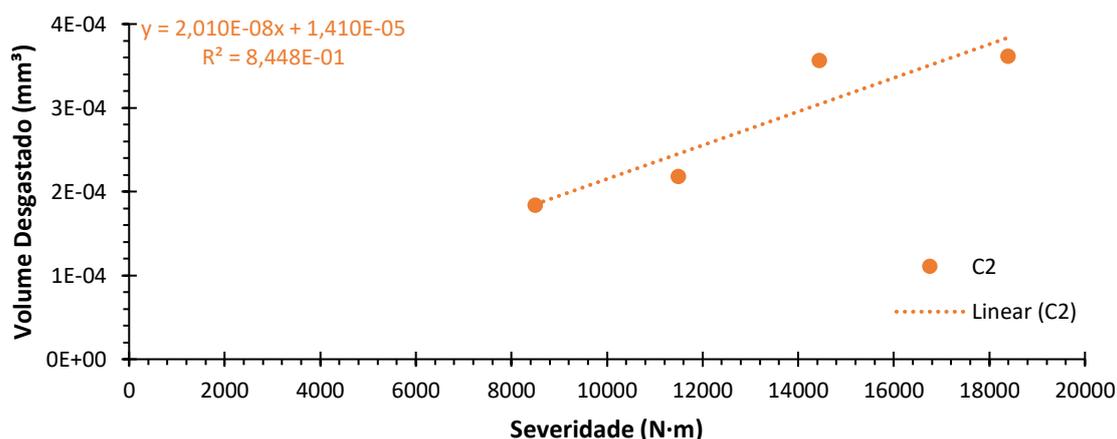


Figura AB. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C2

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C2 possui uma taxa específica de desgaste de $2,010 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m, que permite concluir que, para a amostra C2, o volume de

desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

Volume Desgastado – Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AB. 4.

Tabela AB. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC2

Ensaio	V_{CC} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$4,662 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$8,498 \cdot 10^{-5}$	11500
E – 3	$1,076 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$9,187 \cdot 10^{-5}$	14450

À semelhança da evolução verificada no volume das pistas de desgaste, o volume desgastado no contra corpo evolui de igual modo, ou seja, o menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 3.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AB. 4.

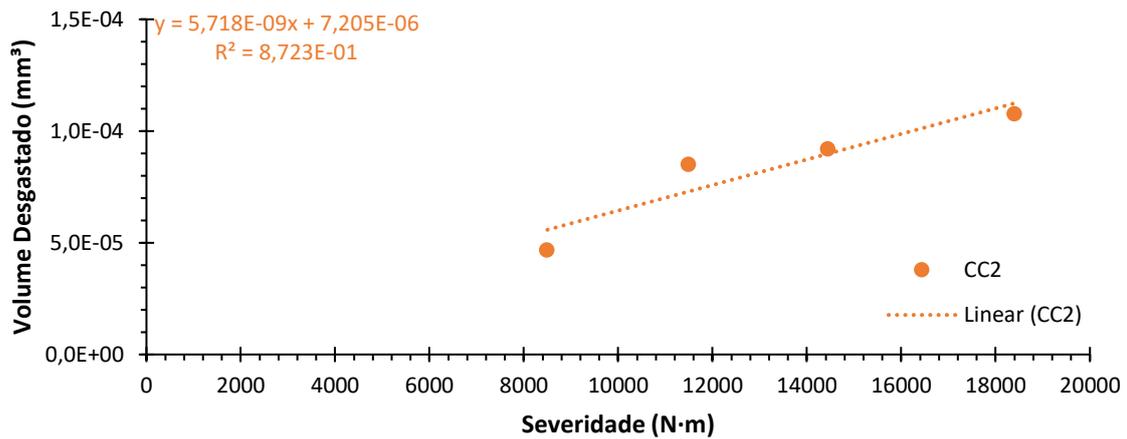


Figura AB. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC2

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $5,718 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

APÊNDICE C – AMOSTRA C3

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AC. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AC. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C3

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	54
E - 2	48
E - 3	52
E - 4	52

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C3, é de apenas 6%.

Na Figura AC. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C3.

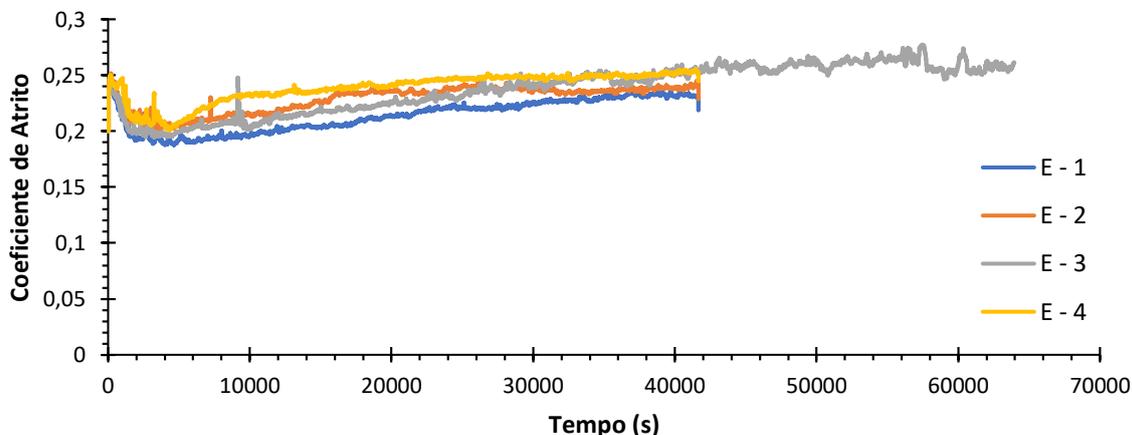


Figura AC. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C3

Verifica-se que, para a carga de menor intensidade, ensaio E – 1, a curva de atrito é inferior às demais. Contudo, a curva correspondente ao ensaios E – 2 encontra-se muito próxima. Já a curva de atrito referente ao ensaio E – 3 apresenta um comportamento semelhante à curva anterior. Por fim, a curva cuja carga normal é a mais elevada, E – 4, apresenta-se acima das restantes.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AC. 2.

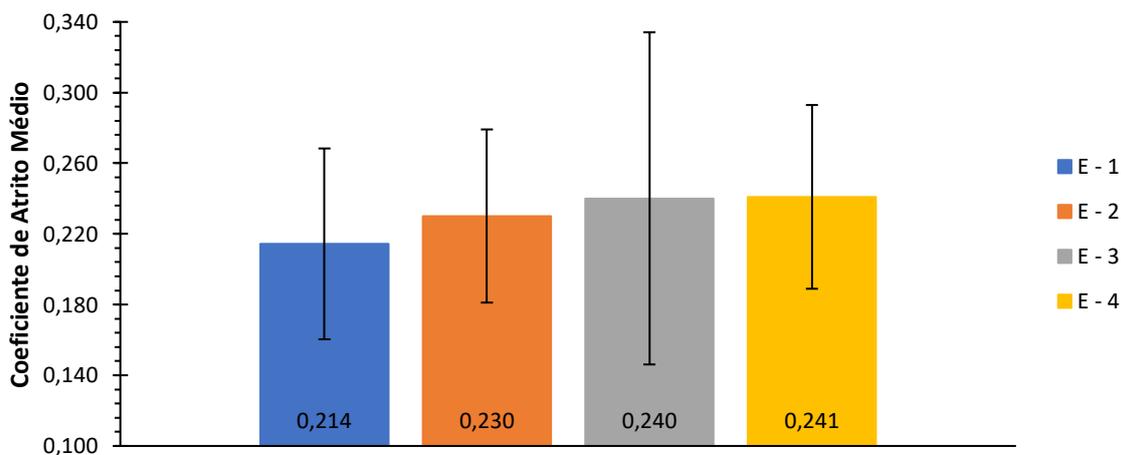


Figura AC. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C3

O ensaio E – 1 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,214. Quanto ao ensaio E – 2, o coeficiente de atrito médio é superior ao ensaio E – 1, fixando-se em 0,220. O ensaio E – 3 apresenta um coeficiente de atrito médio muito superior ao do ensaio E – 2, apresentando um valor de 0,240. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,241, apresentando um valor extremamente próximo do ensaio E – 3, embora a carga aplicada em E – 4 seja substancialmente superior.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C3, encontram-se apresentados na Tabela AC. 2.

Tabela AC. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C3

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,214	0,054
E – 2	0,230	0,049
E – 3	0,240	0,094
E – 4	0,241	0,052

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AC. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AC. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C3, bem como a severidade.

Tabela AC. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C3

Ensaio	V _{PD} (mm ³)	Severidade (N·m)
E – 1	1,17664 · 10 ⁻⁴	8500
E – 2	1,90991 · 10 ⁻⁴	11500
E – 3	2,70814 · 10 ⁻⁴	18400
E – 4	2,21918 · 10 ⁻⁴	14450

Tal como se pode observar na tabela anterior, o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AC. 3.

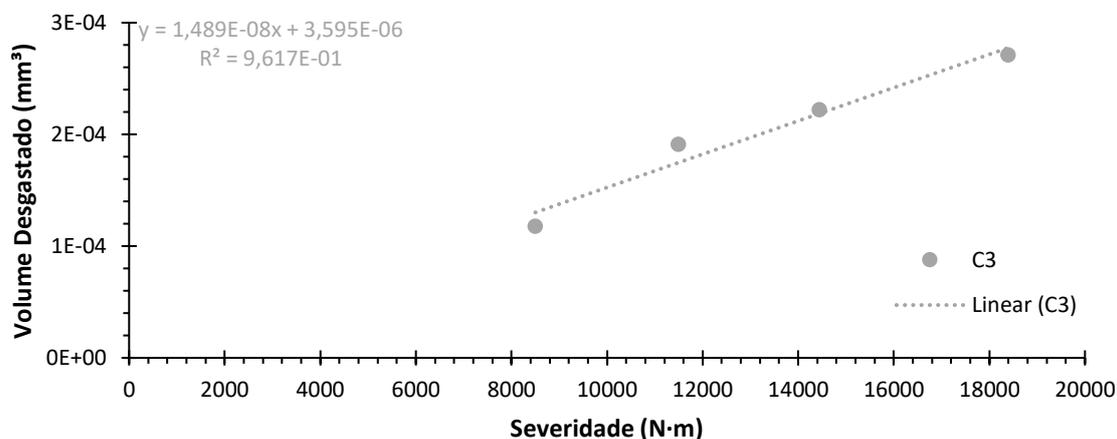


Figura AC. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C3

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C3 possui uma taxa específica de desgaste de $1,48913 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m, que permite concluir que, para a amostra C3, o volume de

desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

Volume Desgastado - Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AC. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC3.

Tabela AC. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC3

Ensaio	V_{CC} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$3,151 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$4,218 \cdot 10^{-5}$	11500
E – 3	$9,608 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$8,443 \cdot 10^{-5}$	14450

À semelhança da evolução verificada no volume das pistas de desgaste, o volume desgastado no contra corpo evolui de igual modo, ou seja, o menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 3.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AC. 4.

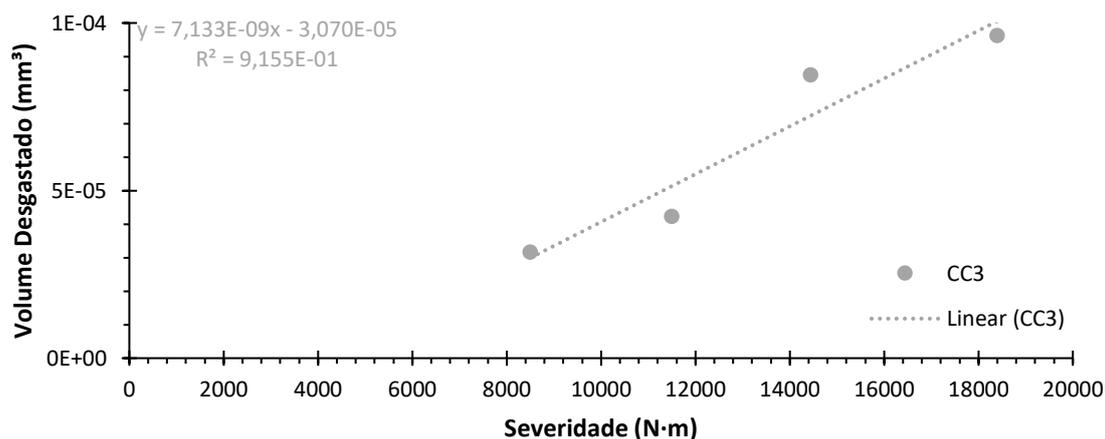


Figura AC. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC3

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $7,133 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

APÊNDICE D – AMOSTRA C4

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AD. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AD. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C4

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	52
E - 2	55
E - 3	53
E - 4	51

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C4, é de 4%.

Na Figura AD. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C4.

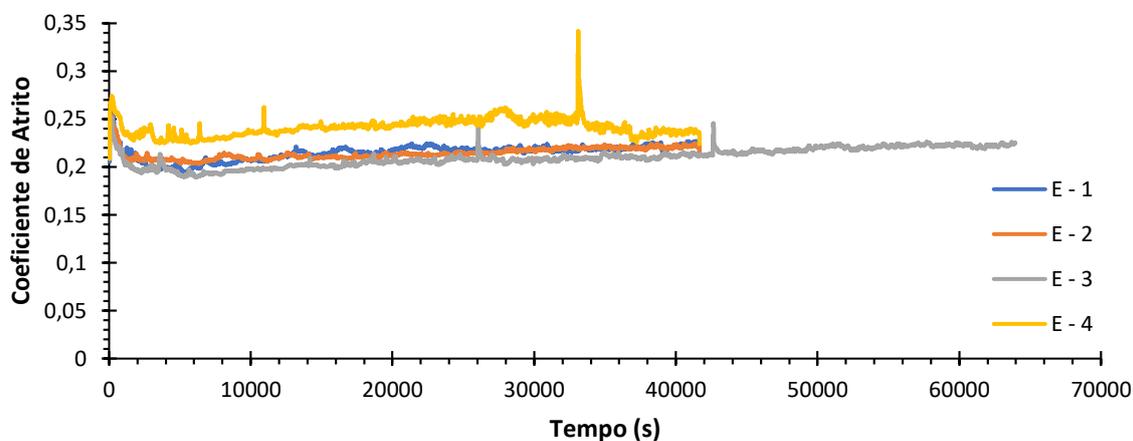


Figura AD. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C4

Verifica-se que, as curvas de atrito correspondentes aos ensaios E – 1, E – 2 e E – 3 encontram-se muito próximas entre si, sugerindo que os referidos ensaios apresentarão coeficientes de atrito médio semelhantes. Por fim, a curva, cuja carga normal é a mais elevada, E – 4, apresenta-se acima das restantes, destacando-se. Este parece ser um comportamento atípico das curvas de atrito, contrariando o que vinha a ser verificado desde a amostra C1: o coeficiente de atrito médio apresenta tendência crescente com o aumento da carga aplicada.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AD. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio

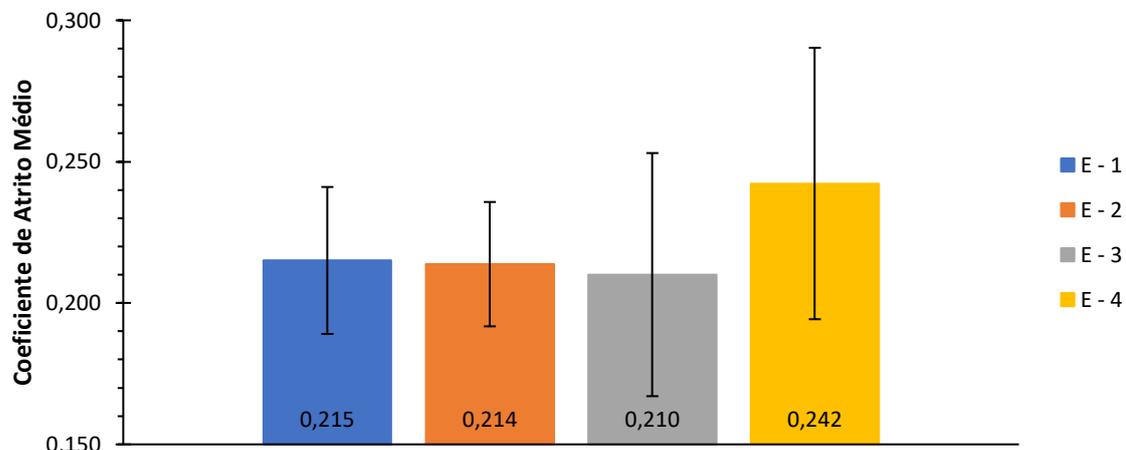


Figura AD. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C4

do conjunto de ensaios da amostra C4

O ensaio E – 3 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,210. Quanto ao ensaio E – 2, o coeficiente de atrito médio é superior ao ensaio E – 3, fixando-se em 0,214. O ensaio E – 1 apresenta um coeficiente de atrito médio semelhante ao do ensaio E – 2, apresentando um valor de 0,215. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,242.

Varição do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C4, encontram-se apresentados na

Tabela AD. 2.

Tabela AD. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C4

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,215	0,026
E – 2	0,214	0,022
E – 3	0,210	0,043
E – 4	0,242	0,048

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AD. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AD. 3, bem como a severidade.

Tabela AD. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C4

Ensaio	V_{PD} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$1,325 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$1,983 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$2,972 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$2,417 \cdot 10^{-4}$	14450

Tal como se pode observar na tabela anterior, o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AD. 3.

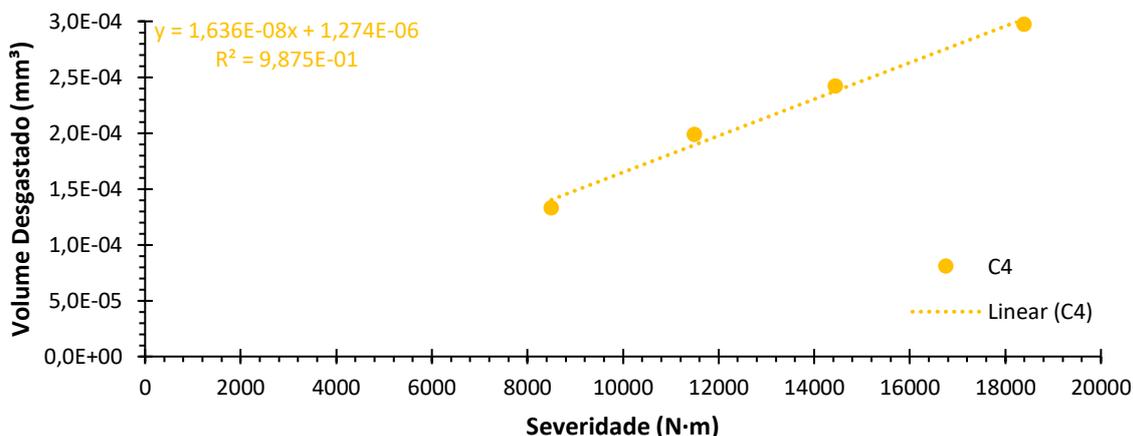


Figura AD. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C4

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respectivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C4 possui uma taxa específica de desgaste de $1,636 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, que permite concluir que, para a amostra C4, o volume de desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

Volume Desgastado - Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AD. 4.

Tabela AD. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC4

Ensaio	$V_{CC} \text{ (mm}^3\text{)}$	Severidade (N·m)
E – 1	$5,296 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$7,745 \cdot 10^{-5}$	11500
E – 3	$1,424 \cdot 10^{-4}$	18400

E – 4

 $1,474 \cdot 10^{-4}$

14450

O menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 4. Tal parece ser uma incongruência, uma vez que é de esperar que o maior volume desgastado surgisse para a maior severidade, o que não se verifica no CC4.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AD. 4.

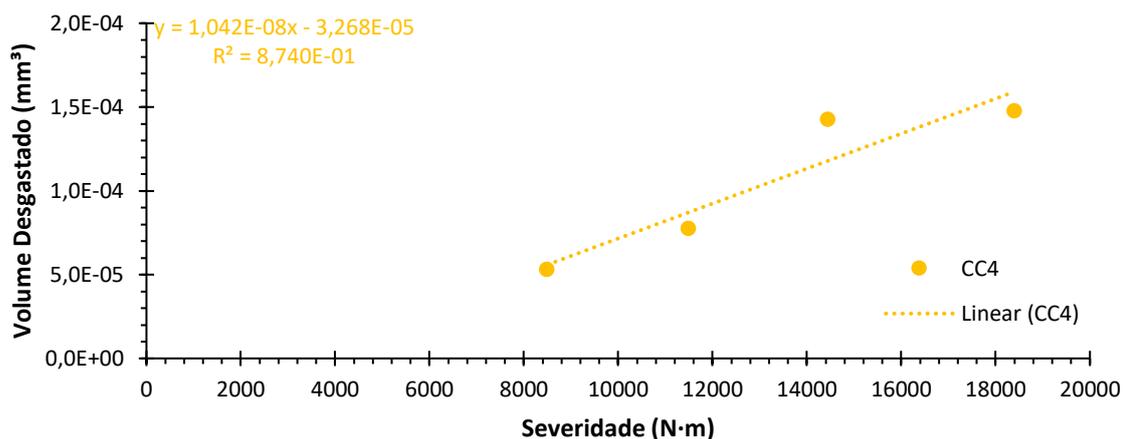


Figura AD. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC4

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $1,042 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

APÊNDICE E – AMOSTRA C5

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AE. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AE. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C5

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	58
E - 2	47
E - 3	41
E - 4	43

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C5, é de 17%.

Na Figura AE. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C5.

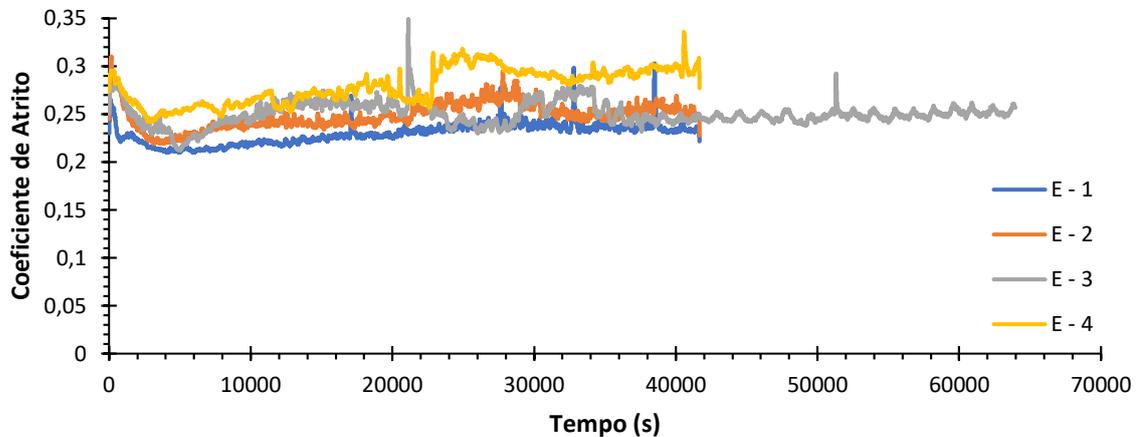


Figura AE. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C5

Verifica-se que, para a menor carga, ensaio E – 1, a curva de atrito é inferior às demais. Contudo, as curvas correspondentes aos ensaios E – 2 e E – 3 encontra-se muito próximas, com valores ligeiramente superiores. Por fim, a curva, cuja carga normal é a mais elevada, E – 4, apresenta-se acima das restantes, destacando-se.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AE. 2.

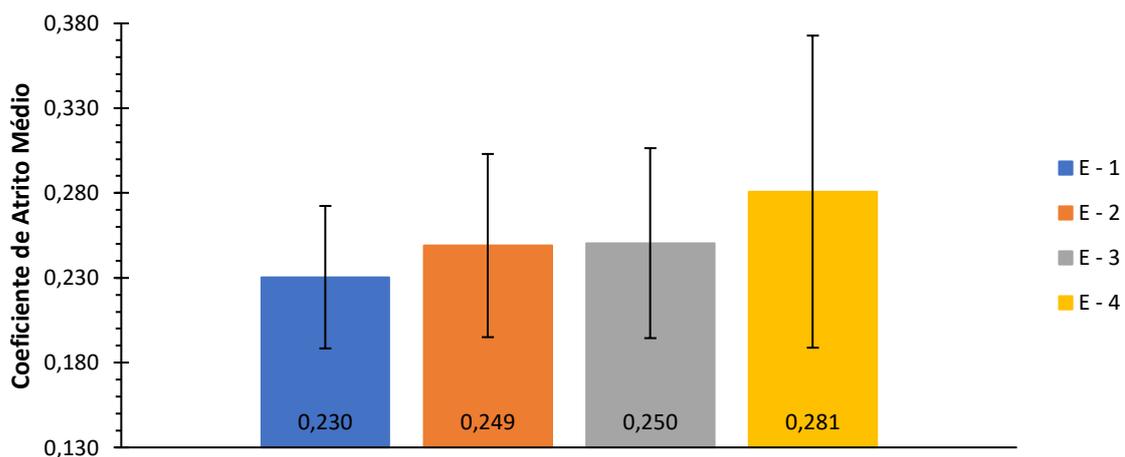


Figura AE. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C5

O ensaio E – 1 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,230. Quanto ao ensaio E – 2, o coeficiente de atrito médio

é semelhante ao ensaio E – 3, fixando-se em 0,249 e 0,250, respetivamente. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o maior coeficiente de atrito médio do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixou em 0,281.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C4, encontram-se apresentados na Tabela AE. 2.

Tabela AE. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C5

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,230	0,042
E – 2	0,249	0,054
E – 3	0,250	0,056
E – 4	0,281	0,092

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AE. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AE. 3, bem como a severidade.

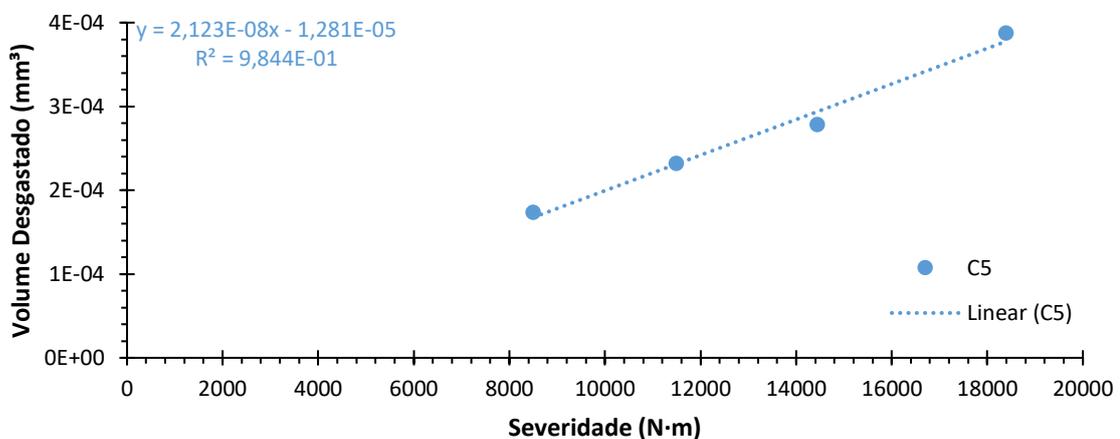
Tabela AE. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C5

Ensaio	V_{PD} (mm ³)	Severidade (N·m)
E – 1	$1,737 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$2,317 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$3,873 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$2,779 \cdot 10^{-4}$	14450

O volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AE. 3.

**Figura AE. 3.** Taxa específica de desgaste da amostra C5

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C5 possui uma taxa específica de desgaste de $2,123 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m, que permite concluir que, para a amostra C5, o volume de

desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

Volume Desgastado - Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AE. 4.

Tabela AE. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade de cada ensaio do contra corpo CC5

Ensaio	V_{CC} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$3,775 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$9,070 \cdot 10^{-5}$	11500
E – 3	$1,267 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$1,586 \cdot 10^{-4}$	14450

O menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 3.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AE. 4.

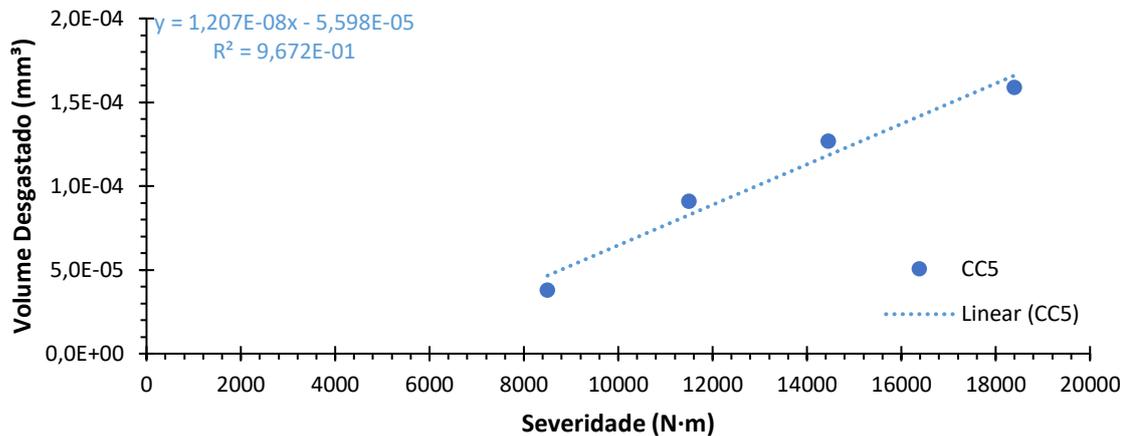


Figura AE. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC5

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $1,207 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

APÊNDICE F – AMOSTRA C6

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AF. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade no ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AF. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C6

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	53
E - 2	45
E - 3	41
E - 4	41

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C6, é de 12%.

Na Figura AF. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C6.

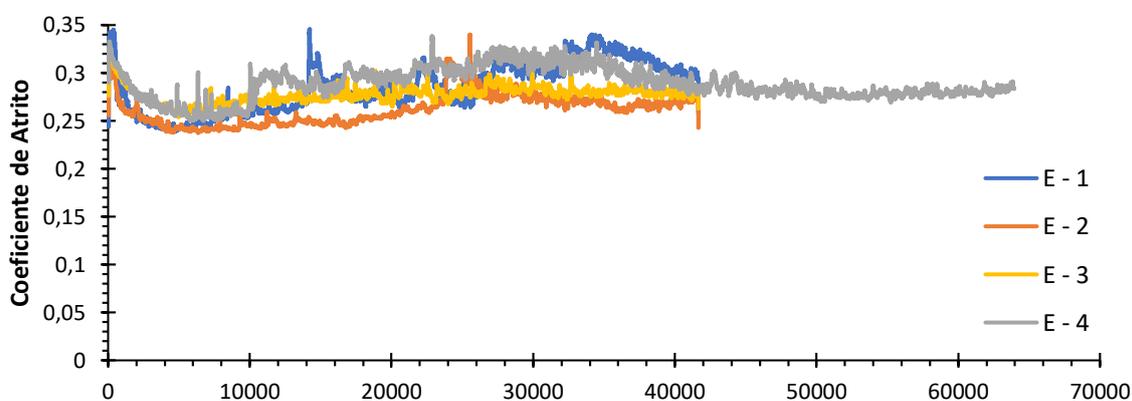


Figura AF. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C6

Verifica-se que não é possível fazer uma distinção clara do comportamento do quarteto de curvas de atrito e afirmar perentoriamente como se comporta cada uma delas, uma vez que estas se intercetam várias vezes, gerando um aglomerado de curvas. Esse comportamento atípico pode ser a repercussão prática da variação de humidade relativa.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AF. 2.

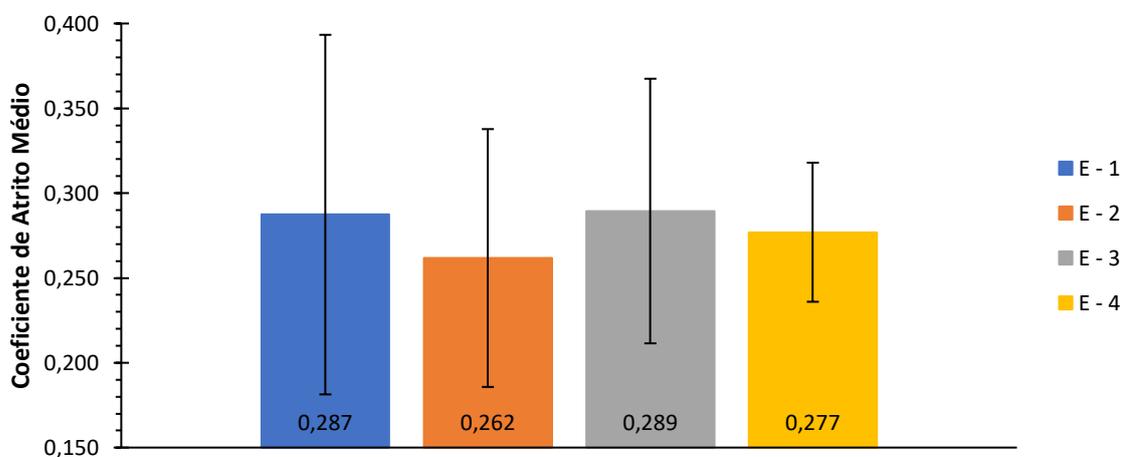


Figura AF. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C6

O ensaio E – 2 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,262. Quanto ao ensaio E – 4, o coeficiente de atrito médio fixa-se em 0,277. Por fim, os ensaios E – 1 e E – 3 apresentam coeficientes de atrito médio semelhantes e como os mais elevados do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixaram em 0,287 e 0,289, respetivamente. Esta não é a evolução esperada do coeficiente de atrito médio.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da confiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C6, encontram-se apresentados na Tabela AF. 2.

Tabela AF. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C6

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,287	0,042
E – 2	0,262	0,054
E – 3	0,289	0,056
E – 4	0,277	0,092

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AF. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AF. 3, bem como a severidade.

Tabela AF. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade de cada ensaio na amostra C6

Ensaio	V_{PD} (mm³)	Severidade (N·m)
E – 1	$1,825 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$2,214 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$3,260 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$2,133 \cdot 10^{-4}$	14450

Tal como foi possível averiguar pelas amostras anteriores, o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. No entanto, a severidade do ensaio E – 2 é inferior à severidade do ensaio E – 3 mas o volume desgastado no ensaio E – 2 é superior ao volume desgastado no ensaio E – 3. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade. Surge uma incongruência nos ensaios tribológicos da amostra C6, pelo que esta amostra parece possuir alguma particularidade.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AF. 3, que expressa a taxa específica de desgaste da amostra C6.

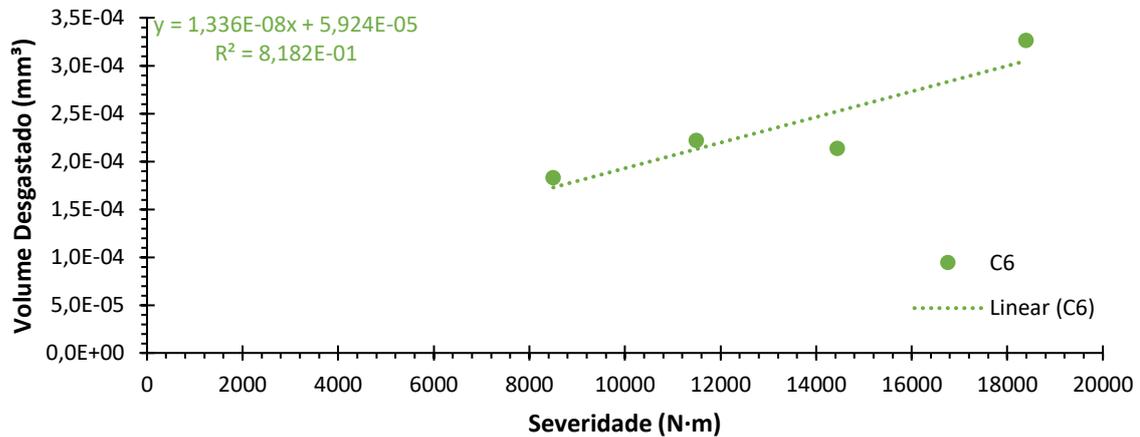


Figura AF. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C6

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C6 possui uma taxa específica de desgaste de $1,33632 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, que permite concluir que, para a amostra C6, o volume de desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8). Embora esta amostra tenha apresentado um comportamento anormal, tal não parece ter-se refletido na taxa específica de desgaste, k .

Volume Desgastado - Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AF. 4.

Tabela AF. 4. Volume desgastado do contra corpo CC6

Ensaio	V_{CC} (mm ³)	Severidade (N·m)
E – 1	$9,011 \cdot 10^{-5}$	8500
E – 2	$2,180 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$1,274 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$1,922 \cdot 10^{-4}$	14450

O menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. De seguida surge os ensaios E – 3, onde a severidade é máxima, e o ensaio E – 4 com volume da calota desgastada superior a E – 3 mas apresenta severidade inferior. O ensaio que apresenta o maior volume desgastado é o ensaio E – 2, que possui a segunda menor severidade. Também a progressão do volume desgastado do contra corpo CC6 difere do comportamento verificado anteriormente nos restantes contra corpo, adensando as dúvidas sobre o comportamento de todo o sistema na amostra C6.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AF. 4.

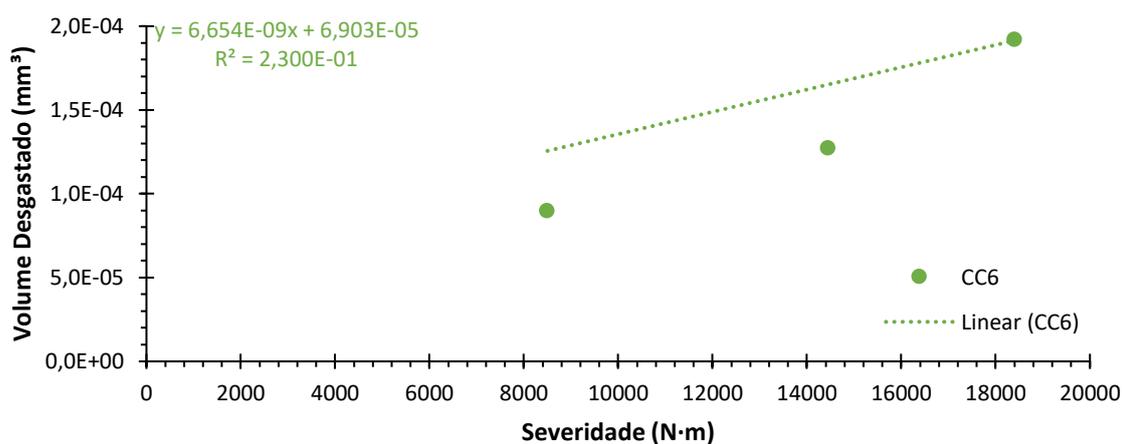


Figura AF. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC6

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de

$6,654 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. No entanto, e atendendo ao gráfico presente na figura anterior, os pontos encontram-se muito dispersos, pelo que a regressão linear efetuada não descreve fielmente o que se sucede, no que à evolução da taxa específica de desgaste k diz respeito. Prova disso mesmo é o valor demasiado baixo do coeficiente de determinação R^2 . Visto isto, algo despoletou este comportamento atípico do desgaste no contra corpo.

APÊNDICE G – AMOSTRA C7

Curvas de Atrito

Uma vez que os resultados fornecidos pelos ensaios tribológicos em questão são fortemente influenciados pela variação da humidade presente na atmosfera envolvente, é importante explicitar qual o valor da humidade relativa no ar, verificada no início de cada ensaio tribológico. Na Tabela AG. 1 é possível conhecer as diferentes percentagens de humidade relativa do ar no início de cada teste tribológico.

Tabela AG. 1. Humidade relativa no instante inicial de cada ensaio da amostra C7

Ensaio	Humidade Relativa Inicial %
E - 1	56
E - 2	53
E - 3	56
E - 4	53

A variação da humidade relativa, verificada no instante inicial da realização de cada um dos quatro ensaios, que constituem o conjunto de testes tribológicos realizados na amostra C7, é e apenas 3%, pelo que uma tão reduzida variação de humidade relativa não influencia os futuros resultados que advirão dos ensaios tribológicos.

Na Figura AG. 1 é possível visualizar as curvas de atrito correspondentes ao conjunto de quatro testes realizados na amostra C7.

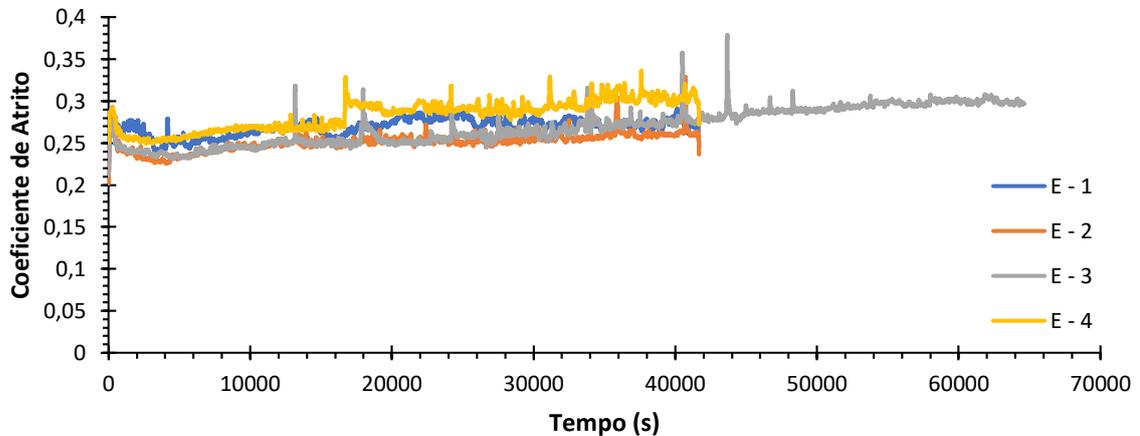


Figura AG. 1. Comparação das curvas de atrito dos diferentes ensaios da amostra C7

Verifica-se que, para o ensaio de carga intermédia E – 2, a curva de coeficiente de atrito apresenta-se inferior às demais. Posteriormente, surgem as curvas E – 1 e E – 3, sobrepostas, numa posição intermédia e acima da curva E – 2. Por fim, no topo, surge a curva relativa ao ensaio E – 4.

Coeficiente de Atrito Médio

Calculando o coeficiente de atrito médio, obteve-se o gráfico mostrado na Figura AG. 2.

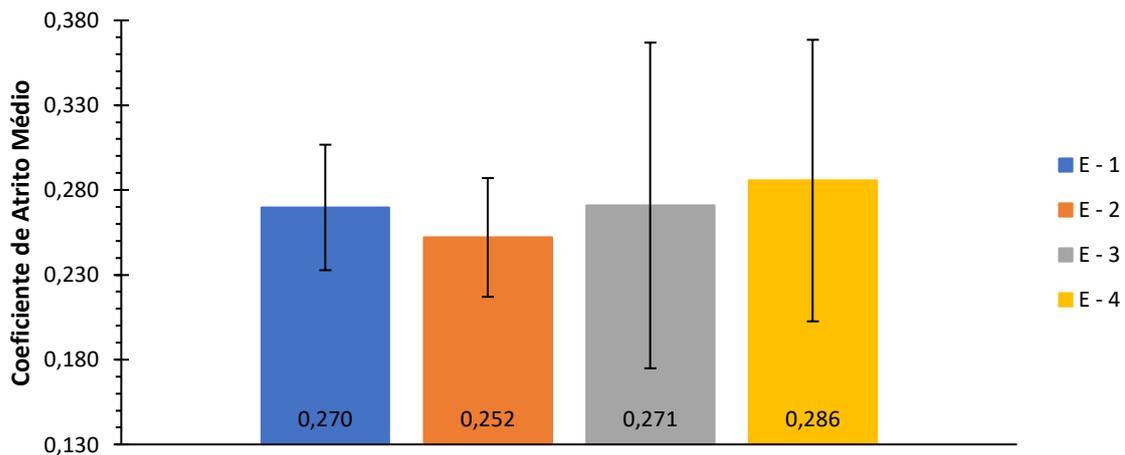


Figura AG. 2. Comparação do coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio do conjunto de ensaios da amostra C7

O ensaio E – 2 apresenta o menor coeficiente de atrito médio do conjunto de quatro ensaios, fixando-se em 0,252. Quanto aos ensaios E – 1 e E – 3, os coeficientes de

atrito médio são praticamente iguais, fixando-se em 0,270 e 0,271. Por fim, o ensaio E – 4 apresenta o coeficiente de atrito médio mais elevado do quarteto de ensaios tribológicos, que se fixa em 0,286.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A determinação da variação do coeficiente de atrito médio é importante na medida em que fornece informação acerca da fiabilidade do cálculo do coeficiente de atrito médio e a variação que este pode apresentar a partir da sua média aritmética. Posto isto, a variação do coeficiente de atrito, relativa aos diversos ensaios tribológicos constituintes da amostra C6, encontram-se apresentados na Tabela AG. 2.

Tabela AG. 2. Variação do coeficiente de atrito na amostra C7

Ensaio	COF_m	ΔCOF
E – 1	0,270	0,037
E – 2	0,252	0,035
E – 3	0,271	0,096
E – 4	0,286	0,083

Os dados da referida tabela encontram-se representados na Figura AG. 2.

Volume das Pistas de Desgaste

Quanto ao volume de cada pista de desgaste, os valores obtidos encontram-se organizados na Tabela AG. 3, bem como a severidade.

Tabela AG. 3. Volume das pistas de desgaste e severidade na amostra C7

Ensaio	$V_{PD} (mm^3)$	Severidade (N·m)
E – 1	$1,795 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$2,098 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$5,595 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$3,987 \cdot 10^{-4}$	14450

O volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade, ou seja, à menor severidade corresponde o menor volume de pista de desgaste, verificando-se para o ensaio E – 1. Posteriormente, ambas as variáveis aumentam e no ensaio E – 3 verifica-se o máximo do volume da pista de desgaste e da severidade.

Taxa Específica de Desgaste – Amostra

Com os dados resultantes da determinação do volume de desgaste é possível construir o gráfico, presente na Figura AG. 3.

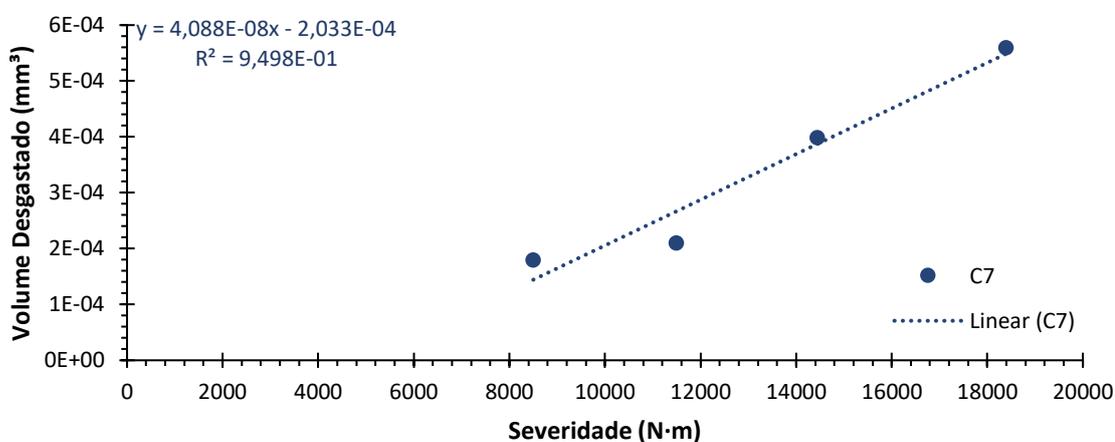


Figura AG. 3. Taxa específica de desgaste da amostra C7

Quanto à taxa específica de desgaste, e após construção do respetivo gráfico de pontos, representativo do volume das pistas de desgaste calculado em função da severidade de cada ensaio a que correspondem, aplica-se uma regressão linear, cujo seu declive caracteriza a referida taxa. Posto isto, a amostra C7 possui uma taxa específica de desgaste de $4,08829 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, que permite concluir que, para a amostra C7, o volume de desgaste varia com proporcionalidade linear direta em relação à severidade, tal como é previsto pela equação (3.8).

Volume Desgastado - Contra Corpo

O contra corpo, constituído por WC-Co, também sofre desgaste significativo, sendo por isso necessário quantificar o seu volume desgastado, estando este expresso, por ensaio, na Tabela AG. 4.

Tabela AG. 4. Volume desgastado do contra corpo e severidade do contra corpo CC7

Ensaio	V_{CC} (mm ³)	Severidade (N·m)
E – 1	$1,552 \cdot 10^{-4}$	8500
E – 2	$1,825 \cdot 10^{-4}$	11500
E – 3	$4,603 \cdot 10^{-4}$	18400
E – 4	$3,156 \cdot 10^{-4}$	14450

O menor volume desgastado verifica-se quando a severidade também é a menor, no ensaio E – 1. Posteriormente, ambos aumentam, registrando-se o maior volume desgastado no contra corpo quando a severidade é máxima, no ensaio E – 3.

Taxa Específica de Desgaste – Contra Corpo

Tal como no caso da taxa específica de desgaste da amostra, o contra corpo também possui a sua própria taxa específica de desgaste, que é determinada pelo declive da regressão linear da Figura AG. 4.

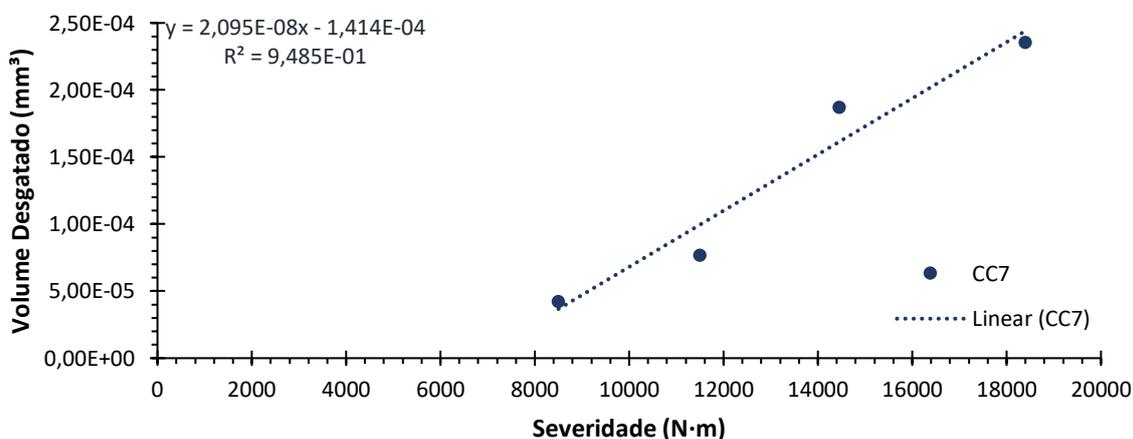


Figura AG. 4. Taxa específica de desgaste do contra corpo CC7

Já o contra corpo, reproduzindo a metodologia seguida para a determinação da taxa específica de desgaste da amostra, apresenta uma taxa específica de desgaste de $2,095 \cdot 10^{-8}$ mm³/N·m.