



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Bruno Marques Domingues

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E
TRIBOLÓGICA DE COMPÓSITOS DE WC-Co E
WC-AISI 304**

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

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Caracterização Mecânica e Tribológica de Compósitos de WC-Co e WC-AISI 304

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

Mechanical and Tribological Characterization of WC-Co and WC-AISI 304 Composites

Autor

Bruno Marques Domingues

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 C/ Agregação da Universidade de Coimbra
Orientador	Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva Investigador da Universidade de Coimbra
Vogais	Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes PALBIT S.A.

Coimbra, Outubro, 2020

“Any fool can know. The point is to understand.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Ao Doutor Luís Vilhena, por todo o apoio, orientação, simpatia e enorme disponibilidade que sempre demonstrou, bem como o conhecimento que me transmitiu no decorrer deste trabalho.

Ao Professor Doutor Amílcar Ramalho, pelo grande apoio e simpatia, pela sábia orientação prestada e pelo vasto conhecimento transmitido, tanto no decorrer da dissertação de mestrado como em outras unidades curriculares por ele lecionadas.

Aos meus pais, Adelino e Céu, pela confiança que em mim depositaram, pelo apoio incondicional, por sempre acreditarem em mim e por todos os sacrifícios que fizeram em prol da minha educação.

Aos meus irmãos, João e Liane, pelo apoio, pela ajuda, pelos risos que me arrancaram e pelos momentos inesquecíveis vividos.

À minha querida Cristina, para quem todas as palavras boas são poucas. Por todo o Amor.

Aos meus amigos, que tudo fizeram para me distrair. Por todos os bons momentos de amizade, festa e trabalho passados.

Resumo

No âmbito deste trabalho foi realizada a caracterização mecânica e tribológica de compósitos de WC-Co e de WC-AISI 304.

Numa primeira fase foram determinadas para os compósitos em estudo as propriedades mecânicas dureza, através do teste de dureza de Vickers com a carga HV30, e tenacidade à fratura através do teste de Palmqvist.

Numa segunda fase, com o intuito de caracterizar o comportamento tribológico dos compósitos, foram efetuados ensaios de deslizamento unidirecional não lubrificado com recurso a um tribómetro pino e disco. Os compósitos de WC-Co e de WC-AISI 304 conjugados com dois contra corpos distintos, um de aço AISI L3 e outro de Al_2O_3 , formam os quatros sistemas tribológicos estudados. Tanto a carga aplicada como a velocidade de deslizamento foram mantidas constantes entre ensaios com o objetivo de minimizar o número de variáveis e a centrar o estudo nos materiais. A partir dos dados fornecidos pelo tribómetro e posterior tratamento foi possível caracterizar o atrito em forma de curva de atrito e coeficiente de atrito médio. Técnicas de perfilometria e de microscopia ótica permitiram a determinação dos volumes de desgaste do disco e do contra corpo, respetivamente, e a partir destes volumes aferir os correspondentes coeficientes de desgaste.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que os sistemas que fazem uso do compósito de WC-Co evidenciam menores coeficientes de desgaste comparativamente aos que fazem uso de WC-AISI 304. Verificou-se também que o coeficiente de atrito médio, assim como o coeficiente de desgaste, variam consoante o par tribológico utilizado. Observou-se que o volume de desgaste segue uma tendência de proporcionalidade direta em função da severidade. Adicionalmente foram estabelecidas correlações entre propriedades tribológicas e propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Carboneto de Tungsténio, Fase ligante, Tribologia, Desgaste por deslizamento, Atrito, Coeficiente de desgaste.

Abstract

In the scope of this work, a mechanical and tribological characterization of WC-Co and WC-AISI 304 composites was performed.

First, the mechanical properties of the composites were determined, hardness through the Vickers indentation test with HV30 load, and fracture toughness through Palmqvist test.

Second, in order to characterize the composites tribological behavior, unidirectional non-lubricated sliding tests were performed using a pin on disc tribometer. The WC-Co and WC-AISI 304 composites combined with two different counter-bodies, one of AISI L3 and another of Al_2O_3 , form the four tribological systems studied. The applied load and the sliding speed were kept constant between tests in order to minimize the number of variables and to focus the study on the materials. From the data provided by the tribometer and subsequent treatment it was possible to characterize the friction in the form of a friction curve and mean friction coefficient. Profilometry and optical microscopy techniques allowed the determination of the wear volumes of the disc and the counter-body, respectively, and from these volumes the corresponding wear coefficients were determined.

Based on the results obtained, the systems that make use of the WC-Co composite show lower wear coefficients compared to those that make use of WC-AISI 304. It was also found that the mean coefficient of friction, as well as the coefficient of wear, vary according to the tribological pair used. It was observed that the wear volume follows a trend of direct proportionality to the severity. Additionally, correlations were established between tribological and mechanical properties.

Keywords Tungsten Carbide, Binder phase, Tribology, Sliding Wear, Friction, Wear Coefficient.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
2. Revisão da Literatura.....	3
3. Materiais, Equipamentos e Procedimentos.....	21
3.1. Materiais	21
3.1.1. Amostras.....	21
3.1.2. Contra Corpos.....	23
3.2. Equipamentos.....	25
3.2.1. Tribómetro.....	25
3.2.2. Perfilómetro.....	28
3.2.3. Microscópio Ótico	30
3.2.4. Microscópio Ótico com Máquina Fotográfica.....	31
3.2.5. Microscópio Eletrónico de Varrimento	32
3.3. Procedimentos.....	33
3.3.1. Medição da Dureza e Tenacidade à Fratura	33
3.3.2. Planeamento dos Ensaios	34
3.3.3. Procedimento Experimental	35
3.3.4. Volume da Pista de Desgaste.....	36
3.3.5. Volume de Desgaste do Contra Corpo	39
3.3.6. Coeficiente de Desgaste.....	40
3.3.7. Caracterização do Atrito	41
3.3.8. Correlação com as Propriedades Mecânicas	43
4. Resultados e Discussão.....	45
4.1. Resultados.....	45
4.1.1. Dureza e Tenacidade à Fratura	45
4.1.2. Sistema A.....	46
4.1.3. Comparação dos Sistemas A, B, C e D	52
4.2. Discussão	56
5. Conclusões.....	71
6. Sugestões para Trabalho Futuro	73
Referências Bibliográficas.....	75
Apêndice A – Sistema B.....	81
Apêndice B – Sistema C.....	86

Apêndice C – Sistema D	91
Apêndice D – Comparação dos Sistemas A e B	96
Apêndice E – Comparação dos Sistemas C e D.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Principais áreas de Aplicação do metal duro. Adaptado de [7].	4
Figura 2.2. Diagrama pseudo-binário do WC-Co (esquerda) e encolhimento durante a fase de sinterização do WC-6Co (direita) [5].	6
Figura 2.3. Micrografia SEM do compósito WC-10Co [6].	7
Figura 2.4. Diagrama de fases do compósito WC-Co (centro) e zona livre de defeitos (WC + β -Co) destacada a amarelo. Imagens microscópicas da fase eta (esquerda) e da grafite (direita) [10].	8
Figura 2.5. Microestrutura do compósito WC-8SS [25].	10
Figura 2.6. Micrografia SEM do compósito WC-15SS indicando a fase eta [25].	11
Figura 2.7. Variação da dureza de Vickers em função do teor em cobalto e do tamanho médio de grão [3].	12
Figura 2.8. Dureza relativa do WC-Co em função da temperatura [3].	12
Figura 2.9. Variação da tenacidade à fratura do WC-Co em função do teor em cobalto e do tamanho médio de grão [3].	14
Figura 2.10. Variação do coeficiente de desgaste em função da dureza em vários compósitos à base de WC [39].	16
Figura 2.11. Progresso do desgaste em função do tempo ou distância de deslizamento e identificação dos vários regimes (a), Progresso do desgaste em função do tempo ou distância de deslizamento para os diferentes mecanismos predominantes de desgaste (b) [37].	18
Figura 3.1. Amostra de WC-Co (a) e amostra de WC-AISI 304 (b).	22
Figura 3.2. Esfera de AISI L3 (a) e esfera de Al ₂ O ₃ (b).	24
Figura 3.3. Tribómetro Pino e Disco utilizado nos ensaios tribológicos.	25
Figura 3.4. Esquematização do Método Pino e Disco [49].	26
Figura 3.5. Mecanismo de fixação dos discos no tribómetro.	26
Figura 3.6. Suporte cónico para fixação do contra corpo (a) e montagem do suporte no tribómetro (b).	27
Figura 3.7. Interface do <i>Software LabView 8</i> .	28
Figura 3.8. Disco de WC-Co colocado sobre a plataforma do perfilómetro.	29
Figura 3.9. Interface do software Formtracepak com um perfil transversal da pista de desgaste do compósito WC-SS.	29
Figura 3.10. Microscópio ótico Mitutoyo Toolmarker's Microscopes.	30
Figura 3.11. Marca de desgaste no contra corpo de alumina.	31

Figura 3.12. Microscópio eletrônico de varrimento <i>Philips XL30</i>	32
Figura 3.13. Esquematização da pista de desgaste formada nos ensaios pino e disco [52].	37
Figura 3.14. Perfil transversal de uma pista de desgaste nivelado e suavizado.	38
Figura 3.15. Representação de uma calota esférica [53].....	39
Figura 3.16. Coeficiente de desgaste de um dos discos.	41
Figura 3.17. Exemplo de uma curva de atrito suavizada de um ensaio tribológico.....	42
Figura 4.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema A.	48
Figura 4.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema A.....	49
Figura 4.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema A.....	50
Figura 4.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema A.	51
Figura 4.5. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A, B, C e D.....	52
Figura 4.6. Gráfico de barras dos coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A, B, C e D.	53
Figura 4.7. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A, B, C e D.....	54
Figura 4.8. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas A, B, C e D.	55
Figura 4.9. Fotografia SEM da pista de desgaste e detritos resultantes do desgaste de um ensaio do sistema D. Segundo uma magnificação de 31x (a), segundo uma magnificação de 63x (b).....	59
Figura 4.10. Fotografias SEM de detritos resultantes do desgaste de um ensaio do sistema D, correspondendo a duas localizações diferentes da periferia da mesma pista de desgaste.	60
Figura 4.11. Fotografia SEM do plano preferencial de deslizamento de um ensaio do sistema D.....	61
Figura 4.12. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e dureza HV30.....	63
Figura 4.13. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e tenacidade à fratura K_{IC}	64
Figura 4.14. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e o módulo de elasticidade E.	65
Figura 4.15. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e a dureza HV30.....	66
Figura 4.16. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e tenacidade à fratura K_{IC}	66
Figura 4.17. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e módulo de elasticidade E.	67
Figura 4.18. Correlação de Evans.	68
Figura AA.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema B.....	82
Figura AA.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema B.	83

Figura AA.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema B.	84
Figura AA.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema B.....	85
Figura AB.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema C.	87
Figura AB.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema C.....	88
Figura AB.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema C.....	89
Figura AB.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema C.....	90
Figura AC.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema D.	92
Figura AC.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema D.	93
Figura AC.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema D.	94
Figura AC.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema D.	94
Figura AD.1. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A e B.....	96
Figura AD.2. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A e B.	97
Figura AD.3. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas A e B.	98
Figura AE.1. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas C e D.	99
Figura AE.2. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas C e D.	100
Figura AE.3. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas C e D.	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Dimensões das amostras de WC-Co e WC-AISI 304.	22
Tabela 3.2. Composição das amostras de WC-CO e WC-AISI 304.	22
Tabela 3.3. Identificação dos sistemas tribológicos em estudo.	34
Tabela 4.1. Resultados dos testes de dureza Vickers e tenacidade à fratura pelo método de Palmqvist – amostra WC-Co.	45
Tabela 4.2. Resultados dos testes de dureza Vickers e tenacidade à fratura pelo método de Palmqvist – amostra WC-SS.	46
Tabela 4.3. Dureza e tenacidade à fratura das amostras de WC-Co e WC-SS.	46
Tabela 4.4. Condições dos ensaios do Sistema A.	46
Tabela 4.5. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema A.	47
Tabela 4.6. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema A.	48
Tabela 4.7. Variação do Coeficiente de atrito do sistema A.	51
Tabela 4.8. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A, B, C e D e correspondentes aumentos percentuais em relação ao coeficiente do sistema B.	54
Tabela 4.9. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas A, B, C e D.	55
Tabela 4.10. Correlações entre as propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos à base de WC.	68
Tabela AA.0.1. Condições dos ensaios do Sistema B.	81
Tabela AA.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema B.	81
Tabela AA.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema B.	83
Tabela AA.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema B.	85
Tabela AB.0.1. Condições dos ensaios do Sistema C.	86
Tabela AB.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema C.	86
Tabela AB.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema C.	88
Tabela AB.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema C.	90
Tabela AC.0.1. Condições dos ensaios do Sistema D.	91
Tabela AC.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema D.	91
Tabela AC.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema D.	92

Tabela AC.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema D.	95
Tabela AD.0.1. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas A e B.	98
Tabela AE.0.1. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas C e D.	101

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_p – Área transversal da pista de desgaste

A_{ind} – Área de indentação

D_{ind} – Média das diagonais de indentação

$\Delta\mu$ – Variação do coeficiente de atrito

F_N – Força normal

F_T – Força transversal

H – Dureza

h_c – Altura da calota

K – Coeficiente de desgaste

K_{cc} – Coeficiente de desgaste do contra corpo

l – Comprimento da fissura

N – Número de rotações do ensaio

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

P – Carga aplicada pelo indentador

R – Raio do contra corpo

R_a – Rugosidade média

r_c – Raio da base da calota

r_p – Raio da pista de desgaste

S – Distância de deslizamento

μ_{med} – Coeficiente de atrito médio

μ_{inst} – Coeficiente de atrito instantâneo

V – Volume

V_c – Volume da calota esférica

V_{cc} – Volume de desgaste do contra corpo

V_p – Volume de desgaste da pista

σ – Desvio padrão

Siglas

AISI – American Iron and Steel Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DURIT – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HRC – Dureza de Rockwell C

HV – Dureza de Vickers

IARC – International Agency for Research on Cancer

ISO – International Organization for Standardization

K_{IC} – Tenacidade à Fratura

SEM – Scanning Electron Microscope

SS – Aço Inoxidável

WC – Carboneto de tungsténio

WC-Co – Compósito à base de carboneto de tungsténio e cobalto

WC-SS – Compósito à base de carboneto de tungsténio e aço inoxidável

WC-AISI 304 – Compósito à base de carboneto de tungsténio e aço inoxidável

AISI 304

% pond – Percentagem ponderal

1. INTRODUÇÃO

À medida que o desenvolvimento tecnológico avança surge a necessidade de encontrar materiais capazes de responder de forma eficaz a novas necessidades. Torna-se assim fundamental melhorar a resistência e durabilidade dos materiais, de forma a reduzir custos e aumentar a rentabilidade. Outro aspeto, cada vez mais importante, prende-se com a relação entre os materiais e o meio ambiente, sendo imprescindível desenvolver materiais mais sustentáveis com um menor impacto ambiental.

O atrito e o desgaste são dois parâmetros de elevada relevância em muitos dos sistemas dinâmicos de engenharia. O estudo destes parâmetros é crucial para o desenvolvimento e melhoria de projetos de sistemas, equipamentos e ferramentas.

Os compósitos à base de carboneto de tungsténio são, em muitos casos, os materiais de eleição em aplicações de desgaste. A elevada dureza e resistência ao desgaste permitem a estes materiais responder de uma forma fiável, mesmo quando aplicados em ambientes agressivos. Tipicamente são constituídos por uma elevada fração volúmica de partículas de carboneto de tungsténio (WC) embebida numa fase ligante de cobalto (Co), denominado WC-Co. No entanto a utilização de uma fase ligante de cobalto acarreta alguns problemas de cariz ambiental e económico. Nesse sentido têm vindo a ser investigadas alternativas, nomeadamente o compósito WC-AISI 304, que faz uso de uma fase ligante de aço inoxidável AISI 304.

Dos vários tipos de desgaste a que estes materiais se encontram sujeitos aquele que mais carece de explicação é o desgaste por deslizamento. Embora já existam vários estudos acerca do desgaste por deslizamento em compósitos à base de WC com fase ligante em cobalto, não existem, até ao momento, estudos comparativos entre compósitos de WC-Co e WC-AISI 304 que avaliem o desgaste por deslizamento não lubrificado com recurso ao método pino e disco.

Assim, os principais objetivos do presente trabalho são:

- A caracterização mecânica dos compósitos de WC-Co e WC-AISI 304, com avaliação da dureza e da tenacidade à fratura.

- A caracterização tribológica dos compósitos de WC-Co e WC-AISI 304 que inclui o estudo do atrito e do desgaste através de ensaios de deslizamento não lubrificado segundo o método pino e disco.
- Relacionar o efeito do uso de diferentes fases ligantes nas propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos à base de WC.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os compósitos à base de WC - carboneto de tungstênio, também designados como metal duro, destacam-se pelas suas propriedades mecânicas, mas principalmente pela excelente resistência ao desgaste que oferecem [1]–[3].

O metal duro é tipicamente constituído por uma elevada fração volúmica de partículas de carboneto de tungstênio de estrutura hexagonal, embebida numa matriz metálica de cobalto [4]. As partículas de carboneto de tungstênio caracterizam-se pela elevada dureza e fragilidade enquanto que a matriz metálica, denominada ligante, confere ao compósito resistência e ductilidade [5].

A combinação de duas fases tão distintas permite a obtenção de um material com propriedades muito próprias, aliando elevada dureza, boa tenacidade à fratura, elevada resistência ao desgaste e à corrosão e capacidade de operar em ambientes com pressões, cargas e temperaturas elevadas [3], [4], [6].

Os compósitos à base de WC são sobretudo utilizados quando a resistência ao desgaste é um fator fundamental. A aplicabilidade destes materiais é vasta, podendo ser utilizados, por exemplo, em ferramentas para corte e conformação de metais, componentes para a indústria mineira e mineralógica, ferramentas de perfuração para indústria extratora de petróleo e gás, componentes militares e mesmo em joalharia [4], [7], [8].

A Figura 2.1 mostra as principais áreas de aplicação do metal duro e as suas importâncias relativas.

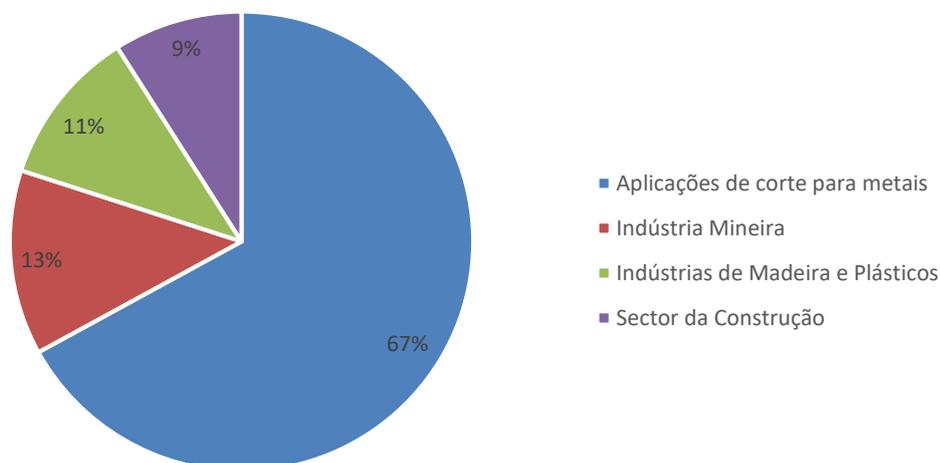


Figura 2.1. Principais áreas de Aplicação do metal duro. Adaptado de [7].

A pulverometalurgia, ou metalurgia do pó, é tipicamente o processo utilizado no fabrico de compósitos à base de WC. As peças obtidas são muito próximas do estado final necessitando de pouco ou nenhum acabamento final e comparativamente, com a metalurgia tradicional, apresenta menor custo energético. Esta tecnologia envolve quatro etapas fundamentais: mistura e moagem dos pós, compactação, sinterização e acabamento final [7].

Na primeira fase, mistura e moagem, são misturados pós de WC, pós metálicos e aditivos. Estes aditivos são normalmente lubrificantes, de forma a reduzir o atrito durante a compactação, ligantes, com o objetivo de aumentar a resistência das peças antes da sinterização, e desfloculantes para evitar aglomeração dos pós [9]. A mistura e moagem do pó compósito é um passo fundamental para garantir a distribuição homogénea do WC no pó metálico de forma a evitar porosidades e assegurar propriedades mais isotrópicas [7]. De realçar que a pureza, a distribuição granulométrica e a morfologia dos pós têm um grande impacto nas propriedades finais do componente.

Após a preparação dos pós segue-se a compactação destes através de um processo de prensagem. À medida que a compactação ocorre a pressão aumenta assim como a densidade. Numa primeira fase verifica-se o rearranjo das partículas e um aumento do número de pontos de contactos entre estas. Numa segunda fase as partículas começam a

sofrer deformação plástica e o volume dos poros diminui [9]. Durante o processo de compactação o pó de WC não sofre deformação. Assim, no final desta etapa a porosidade encontra-se ainda entre 35 a 50 % [7]. A pressão de compactação está fortemente ligada à densidade e esta às propriedades físicas e mecânicas do componente final. As peças obtidas após conformação designam-se “em verde” referente ao estado inacabado.

A sinterização é um processo térmico que consiste em aquecer as peças “em verde” em fornos de sinterização, com ou sem pressão, de modo a promover a completa densificação da peça para que esta obtenha as propriedades mecânicas finais desejadas. O controlo da microestrutura e das propriedades mecânicas do metal duro encontra-se intimamente relacionado com a etapa de sinterização [10]. Os compósitos à base de carboneto de tungsténio, como o WC-Co, são produzidos através de sinterização em fase líquida a temperaturas de entre 1370°C e 1425°C, abaixo tanto da temperatura de fusão do WC (2800°C) como do cobalto puro (1495°C) [5]. Este método compreende quatro etapas. Na primeira etapa verifica-se um encolhimento da peça devido à redução de óxidos e pela desgaseificação do ligante e das impurezas. Na segunda etapa, o aumento de temperatura faz iniciar a sinterização em estado sólido. A fase ligante molha as partículas de WC e ocorre difusão no estado sólido. A porosidade diminui e a densificação ocorre devido ao rearranjo das partículas [10]. A temperatura continua a aumentar e promove a dissolução do WC em fase gamma cuja temperatura de fusão é baixa ocorrendo a sua fusão [9]. Inicia-se a terceira fase, a sinterização em fase líquida, na qual os grãos de WC são dissolvidos no ligante até à saturação. Durante esta etapa os grãos mais pequenos são preferencialmente dissolvidos e os de tamanho superior tendem a crescer. A Figura 2.2 mostra do lado esquerdo o diagrama pseudo-binário do WC-Co e do lado direito o encolhimento verificado durante a fase de sinterização de WC-6Co. Na última etapa, o arrefecimento, ocorre a solidificação do ligante e pode ocorrer reprecipitação de W e C contribuindo para um aumento do tamanho de grão [10].

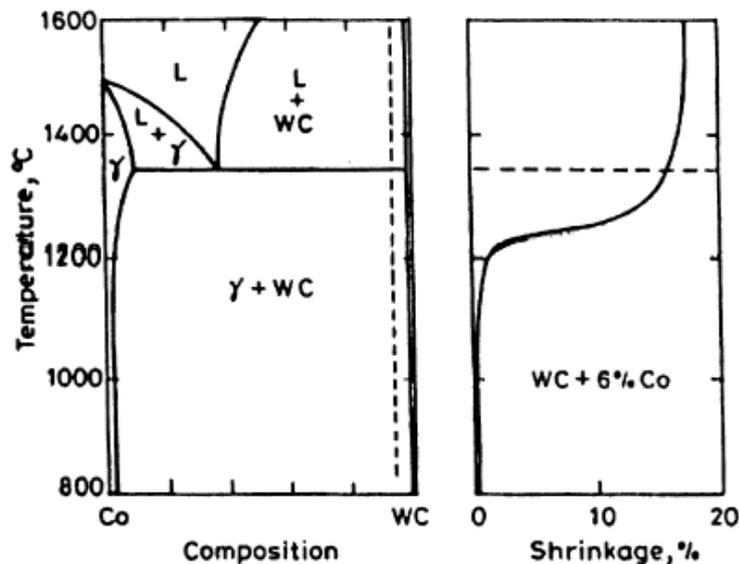


Figura 2.2. Diagrama pseudo-binário do WC-Co (esquerda) e encolhimento durante a fase de sinterização do WC-6Co (direita) [5].

Concluída a fase de sinterização podem ainda ser necessárias operações de acabamento final de forma a garantir controlo dimensional [9]. Podem nesta fase ser usados processos de retificação, ou electroerosão de fio e de penetração para geometrias mais complexas [11]. Polimento com recurso a abrasivos de diamante é também usado para melhorar o acabamento superficial.

O cobalto tem sido o metal ligante de eleição em compósitos à base de WC desde 1926 após a produção do primeiro metal duro, WIDIA-N, composto por 6 % de peso em cobalto. Este elemento metálico possui excelentes características, sendo usado como ligante em cerca de 90 % de todo o metal duro fabricado, com composições a variar entre 3 a 25 % em peso. Uma das principais vantagens na utilização do cobalto como ligante em compósitos à base de WC consiste na alta densificação que este promove, em especial na primeira fase de sinterização [5]. A rápida densificação inicial deve-se à forte difusão que se verifica, formando fronteiras de grão próximas e compactas [5]. O cobalto apresenta, comparativamente a outros metais, elevada molhabilidade das partículas de WC sendo possível obter uma densificação quase total. Outras razões que justificam a superioridade

deste ligante estão relacionadas com a facilidade de moagem dos pós, a alta solubilidade de WC no cobalto assim como as boas propriedades mecânicas do compósito WC-Co [12].

O compósito WC-Co tradicional é formado por uma elevada fração volúmica de partículas de fase α -WC, de estrutura hexagonal, embebidas numa matriz de cobalto.

Classifica-se em diferentes classes com base na percentagem em peso de Co e no tamanho de grão de WC. As classes que compreendem percentagens em peso entre 10-20 % e tamanho de grão entre 1-5 μm apresentam elevada resistência e tenacidade à fratura combinada com boa resistência ao desgaste. Já as classes com percentagens em peso entre 3-15 % e tamanho de grão abaixo de 1 μm exibem elevada dureza, elevada resistência à compressão e resistência ao desgaste excepcional [3]. Classes de grão ultrafino, abaixo de 0,5 μm , permitem a combinação de elevada dureza, resistência ao desgaste e tenacidade à fratura.

A Figura 2.3 representa a microestrutura típica de um compósito à base de carboneto de tungsténio com ligante cobalto. As partículas de WC (áreas a cinzento claro) assumem forma prismática e apresentam uma distribuição uniforme pelo ligante cobalto (áreas a cinzento escuro).

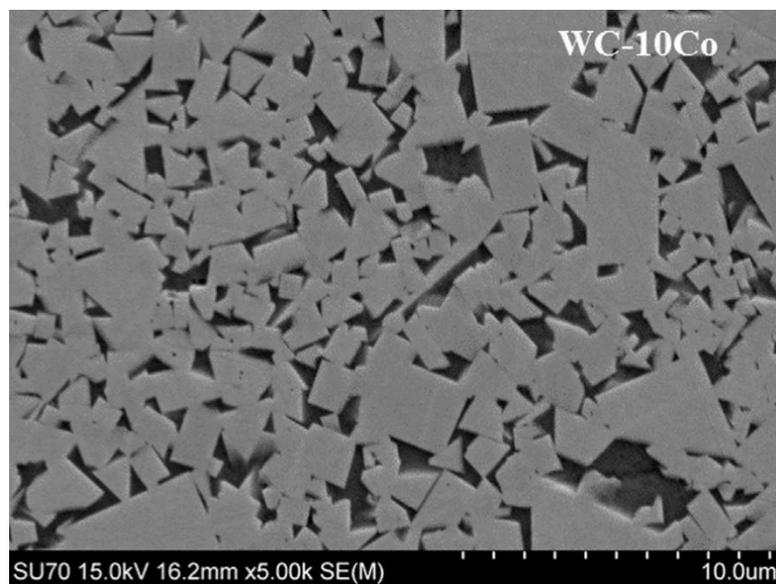


Figura 2.3. Micrografia SEM do compósito WC-10Co [6].

O controlo do teor em carbono durante a sinterização tem um papel fundamental na microestrutura do WC-Co. Na Figura 2.4, ao centro, é evidenciado o diagrama de fases

do WC-Co onde se encontra destacada a amarelo a região composta por WC e β -Co livre de defeitos. Quantidades de carbono deficientes podem levar à formação de um carboneto composto por W, Co e C denominado fase eta (fase- η), representada na Figura 2.4, à esquerda. Esta fase engloba dois compostos, M_6C e $M_{12}C$ e está ligada à diminuição da tenacidade à fratura do metal duro especialmente se precipitar na forma de grandes dendrites [10]. Por oposição, se a quantidade de carbono for excessiva, parte deste pode precipitar sob a forma de grafite degradando as propriedades mecânicas do compósito [10]. A grafite encontra-se representada na Figura 2.4 à direita.

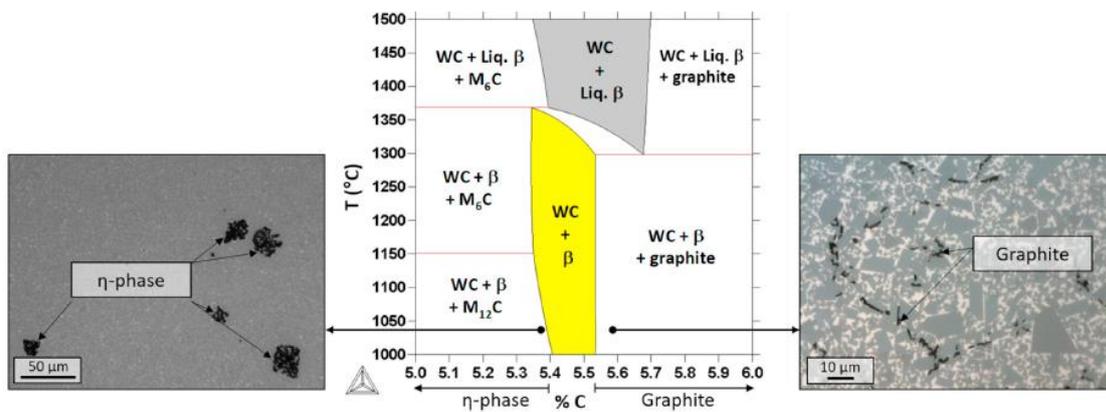


Figura 2.4. Diagrama de fases do compósito WC-Co (centro) e zona livre de defeitos (WC + β -Co) destacada a amarelo. Imagens microscópicas da fase eta (esquerda) e da grafite (direita) [10].

Apesar de todas as vantagens que o cobalto apresenta enquanto fase ligante, vários são também os problemas associados ao uso do mesmo.

Atualmente os compósitos à base de carbonetos de tungstênio com ligante cobalto estão incluídos no grupo 2A da *International Agency for Research on Cancer*, IARC, identificados como potencialmente carcinogênicos [13]. Já o cobalto faz parte do grupo 1 da IARC, classificado como carcinogênico para seres humanos. Segundo a *European Chemicals Agency*, ECHA [14], o elemento cobalto para além de carcinogênico, é suspeito de ser mutagênico, podendo afetar a fertilidade. Pode, também, causar reações alérgicas na pele e dificuldades respiratórias se inalado, assim como efeitos de longa duração no meio aquático.

A República Democrática do Congo é o maior produtor de cobalto, fornecendo cerca de 58% deste elemento e detendo cerca de 60 % das reservas mundiais [15]. A instabilidade política, conflitos internos, guerra civil, fracas infraestruturas, técnicas artesanais de mineração e trabalho infantil são alguns dos problemas que dificultam a exploração e trocas comerciais [16].

Para além das diversas aplicações metalúrgicas, mais de metade do cobalto produzido tem como destino o fabrico de baterias de iões de lítio. Este tipo de baterias é usado em equipamento eletrónicos como computadores portáteis, *smartphones* e em veículos elétricos [16]. A acentuada procura por baterias de iões de lítio tem provocado um aumento na procura do cobalto, o que se traduz no aumento do seu custo.

Tendo em conta as razões evidenciadas torna-se necessário encontrar novas soluções que permitam a substituição do ligante cobalto por uma alternativa mais económica, menos tóxica e com propriedades iguais ou superiores.

Uma das potenciais alternativas consiste na substituição total ou parcial do cobalto por outros metais de transição como Fe, Cr e Ni [17]–[20].

O WC-Co tradicional apresenta algumas limitações no que diz respeito à resistência à corrosão e nesse sentido a utilização de ligantes de Cr e Ni tem sido alvo de pesquisa como tentativa de melhorar esta propriedade no metal duro [21]–[23]. Estudos realizados com WC-Ni-Fe e WC-AISI304 demonstraram resistência à corrosão superior comparativamente ao tradicional WC-Co [24], [25].

O WC-AISI304 é um compósito à base de carboneto de tungsténio com fase ligante em aço inoxidável AISI 304, tendo como principais constituintes Ni, Fe e Cr. Este material faz parte da família dos compósitos WC-SS. Num estudo realizado por B.J. Marques *et al.* [25] sobre a aplicação do ligante aço inoxidável AISI304 em metal duro, com teores a variar entre 6 e 15 % em peso, verificou-se que o ligante apresentava boa molhabilidade durante a fase de sinterização, a temperaturas entre 1440 e 1520°C, sendo possível obter, após prensagem isostática a quente, elevadas densidades relativas entre 96-99 %. De referir também que o estudo indica um aumento de dureza comparativamente ao WC-Co tendo a tenacidade à fratura sido preservada.

Outros trabalhos realizados com WC-SS produzidos através de pulverização catódica obtiveram boas relações entre dureza e tenacidade à fratura [26], [27].

Na Figura 2.5 é possível vislumbrar a microestrutura do compósito WC-AISI304 com 8 % em peso de aço inoxidável. A microestrutura compreende partículas de WC, representadas nas áreas a cinzento claro, bem distribuídas através da fase ligante representada nas áreas a cinzento-escuro. Comparativamente ao tradicional WC-Co, a maior diferença a nível de microestrutura consiste no formato das partículas de WC, sendo estas menos prismáticas no WC-SS.

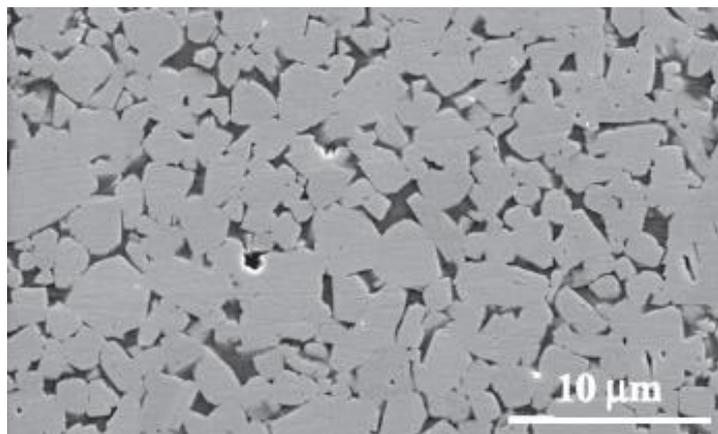


Figura 2.5. Microestrutura do compósito WC-8SS [25].

Tal como acontece no WC-Co, o controlo do teor em carbono no WC-SS é fundamental para evitar tanto o aparecimento da fase-eta, pobre em carbono como a fase grafite, rica em carbono [28]. Na Figura 2.6 a elipse evidencia a presença de fase-eta no compósito WC-15SS.

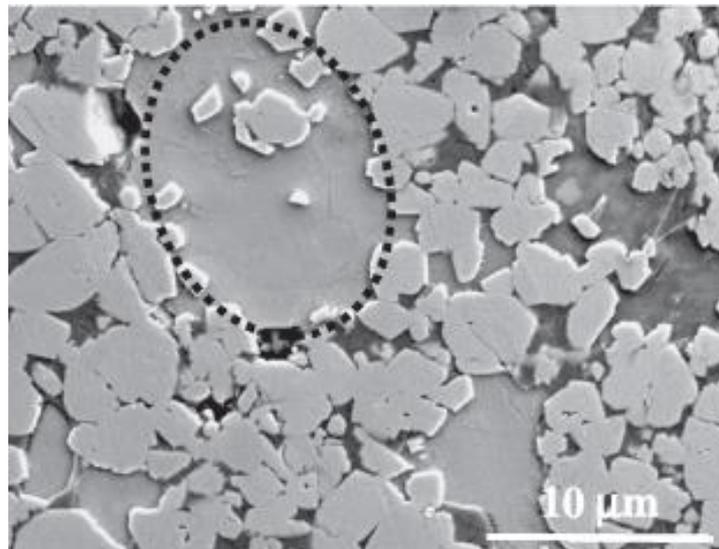


Figura 2.6. Micrografia SEM do compósito WC-15SS indicando a fase eta [25].

Resultados obtidos por C.M. Fernandes *et al.*[26] revelam que a formação de fase-eta em compósitos de WC-SS produzidos através de deposição catódica produz um aumento de dureza sem perda de tenacidade à fratura.

De outra forma, Trung *et al.* [29] através da adição de 2 % em peso de grafite demonstrou ser possível aumentar a densificação assim como a dureza e tenacidade à fratura em WC-10AISI 304.

O desempenho do metal duro, nas diferentes aplicações de desgaste em que é usado, encontra-se intimamente relacionado com as suas propriedades mecânicas. Desta forma, é essencial compreender não só as principais propriedades mecânicas dos compósitos à base de WC, mas também a dinâmica das mesmas.

A dureza pode ser vista como uma medida de resistência à penetração no material e corresponde a uma das propriedades mecânicas de maior destaque nos compósitos à base de WC. Sendo o metal duro um material constituído por uma fase de WC dura e frágil e por uma fase de ligante dúctil, a dureza é principalmente atribuída à fase de carboneto de tungstênio. A composição química, a porosidade assim como a microestrutura têm influência sobre esta propriedade.

Nos compósitos à base de WC a dureza encontra-se inversamente relacionada com o teor do ligante e com o tamanho de grão, como pode ser analisado a partir da Figura

2.7 [3], [10], [11]. Assim, maiores durezas podem ser conseguidas com recurso a baixos teores de fase ligante e a grão ultra fino.

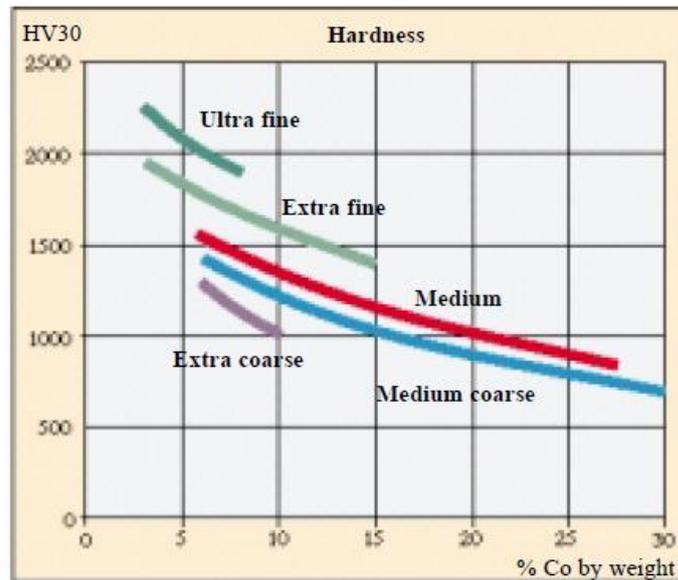


Figura 2.7. Variação da dureza de Vickers em função do teor em cobalto e do tamanho médio de grão [3].

Com o aumento de temperatura e consequencialmente aumento da plasticidade verifica-se uma diminuição da dureza relativa no metal duro [3]. Esta relação é elucidada na Figura 2.8.

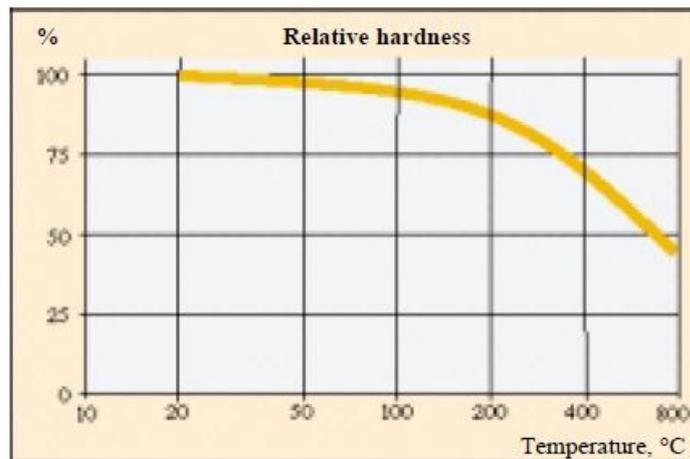


Figura 2.8. Dureza relativa do WC-Co em função da temperatura [3]

Na Figura 2.7 podem também ser analisadas as durezas típicas para várias concentrações de Co e tamanhos médios de grão. Verificam-se durezas a partir de 700 HV para metal duro com elevado teor de Co e maior tamanho médio de grão. Para classes de tamanho de grão ultra fino e reduzido teor em cobalto verificam-se durezas até 2200 HV.

C.M. Fernandes *et al.* [4] realizaram uma caracterização mecânica de metal duro com fase ligante de AISI 304 obtendo valores de dureza de 1547 HV para o WC-10SS e de 1502 HV para o WC-10SS-C com adição de carbono.

O teste de dureza de Vickers, de acordo com a ISO 3878, é a técnica mais apropriada para determinar a dureza em compósitos à base de WC [30]. Este método consiste em indentar a superfície polida do metal duro com um diamante em forma de pirâmide quadrangular. O tamanho da marca deixada é inversamente proporcional à dureza. A carga HV30, correspondendo a uma força de 30 kg e 294 N, é normalmente a mais usada [31].

A tenacidade à fratura pode ser definida como uma medida de resistência à propagação de fissuras que o material suporta. Esta propriedade é fundamental nos compósitos à base de WC pois, devido ao comportamento semelhante a um material cerâmico, o risco de fratura frágil é elevado. A tenacidade à fratura encontra-se relacionada com a ductilidade do material, portanto, a fase ligante será aquela que mais contribuirá para esta propriedade.

A fratura em compósitos à base de WC ocorre de diferentes formas: fratura por clivagem em grãos de WC, fratura ao longo das fronteiras de grão entre grãos de WC e fratura de cisalhamento no ligante. O aumento do tamanho de grão promove as fraturas por clivagem enquanto que o aumento do teor de ligante aumenta a fratura por cisalhamento [3]. Parte dos mecanismos de desgaste no metal duro estão relacionados com mecanismos de fratura superficial. Desta forma, a magnitude do desgaste é controlada pela tenacidade à fratura das camadas superficiais [32].

O método de Palmqvist permite quantificar a tenacidade à fratura através do fator K_{IC} (*critical stress intensity factor*). Este fator é determinado a partir do comprimento das fissuras produzidas durante o teste de indentação de Vickers [31].

Contrariamente à dureza, a tenacidade à fratura é diretamente proporcional ao tamanho médio do grão e ao teor de fase ligante, como pode ser observado na Figura 2.9 [3], [10], [11].

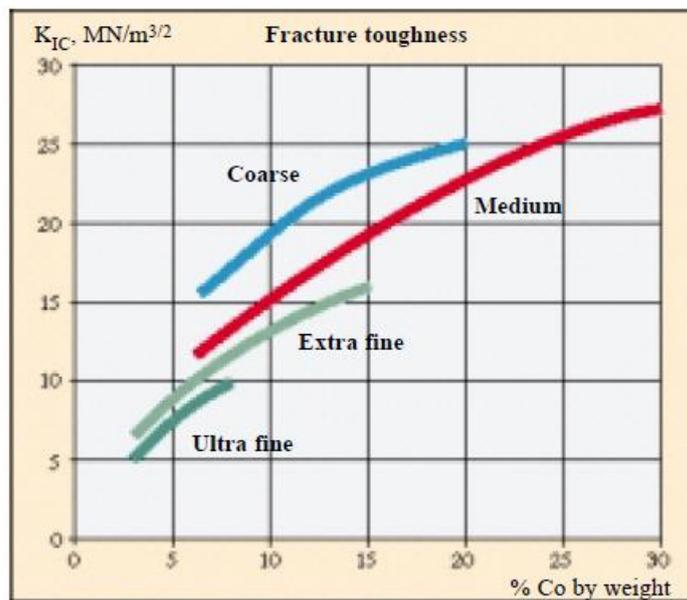


Figura 2.9. Variação da tenacidade à fratura do WC-Co em função do teor em cobalto e do tamanho médio de grão [3].

Segundo Schubert *et al.* [33] em WC-Co de grão fino, para uma determinada dureza, o aumento do teor em fase ligante não se traduz necessariamente num aumento da tenacidade à fratura.

No que diz respeito à influência da temperatura na tenacidade à fratura, até cerca de 600°C não é verificada nenhuma alteração de relevância. No entanto, a partir de 700°C a tenacidade à fratura aumenta. Este fenómeno ocorre devido ao aumento da plasticidade na ponta da fissura e também devido à diminuição da dureza relativa causada pelo aumento da plasticidade do compósito [5].

De acordo com C.M. Fernandes *et al.* [26] os compósitos com fase ligante em aço inoxidável apresentam melhor compromisso entre dureza e tenacidade à fratura comparativamente ao sistema WC-Co. O mesmo autor obteve valores de K_{IC} de 10,6 $MPa \cdot m^{1/2}$ para WC-6SS, 11,4 $MPa \cdot m^{1/2}$ para WC-9SS e 12,9 $MPa \cdot m^{1/2}$ para WC-12SS [26].

Tendo em conta que, regra geral, os fatores que permitem o aumento da dureza são os mesmos que se traduzem num decréscimo da tenacidade à fratura, o equilíbrio entre

estas propriedades é de grande importância e a aplicação do compósito deve ser estudada cuidadosamente de forma a ser conseguida a melhor combinação de propriedades possível.

A título exemplificativo, em ferramentas de mineração onde é necessária elevada tenacidade à fratura e resistência ao impacto, são usados WC-Co de grão mais grosseiro e com elevada fração de ligante [34]. Por outro lado, em aplicações de corte de metais onde é exigida alta dureza e resistência ao desgaste, WC-Co de grão fino e baixos teores de fase ligante são mais indicados [34].

A resistência ao desgaste é a característica de maior destaque nos compósitos à base de WC. As propriedades tribológicas e os mecanismos de desgaste encontram-se intimamente relacionados com a resistência ao desgaste e, nesse sentido, devem ser alvo de análise.

A tribologia é o ramo da ciência responsável pelo estudo do desgaste, atrito e lubrificação no movimento relativo entre superfícies de materiais [35]. O desgaste pode ser definido como a perda de material devido a interações tribológicas entre superfícies com movimento entre si. O desgaste por abrasão, por erosão e por deslizamento são os três tipos de maior relevância que ocorrem em metais duros [36].

O desgaste por deslizamento acontece quando duas superfícies em contacto deslizam entre si, podendo o contacto ser ou não lubrificado. Os mecanismos de desgaste envolvidos são: adesão, fadiga superficial, triboquímico e abrasão [37]. Fatores como temperatura, pressão, contra corpo, formação de tribofilmes, transformações de fase e lubrificação podem influenciar neste tipo de desgaste [38].

Segundo Engqvist *et al.* [38] o desgaste por deslizamento, comparativamente a outros tipos de desgaste, depende mais das características das superfícies em contacto, pelo que se torna difícil prever o atrito e o desgaste a partir das propriedades gerais do compósito.

Pirso *et al.* [39], [40] e Larsen-Basse [41] propuseram explicações semelhantes para o desgaste por deslizamento não lubrificado em compósitos à base de WC com fase ligante em cobalto, sugerindo a existência de vários mecanismos de desgaste. Numa primeira fase, o desgaste é causado pela remoção de fase ligante devido a deformação plástica e também por microabrasão causada por grãos de WC. Numa fase seguinte ocorre fratura e fragmentação de grãos de WC deixados à superfície pela extrusão do ligante.

No mesmo tipo de ensaios, Engqvist *et al.* [42] verificou que detritos de WC eram aglomerados com o ligante cobalto levando à formação de um tribofilme de grão fino.

É sugerido que a formação da camada com características diferentes do compósito ao longo da pista de desgaste tem um efeito protetor da superfície podendo influenciar a resistência ao desgaste. O mesmo autor constatou que tanto o aumento da velocidade de deslizamento como o aumento da carga normal aplicada durante um ensaio provocam uma redução do coeficiente de atrito [42].

Resultados semelhantes em amostras de WC-Co foram obtidos por Liu *et al.* [43], revelando que o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste diminuem com o aumento da velocidade de deslizamento. Jia e Fischer [44] realizaram um conjunto de ensaios de desgaste por deslizamento sem lubrificação em carbonetos cementados tradicionais e também em nano-estruturados, conseguindo estabelecer algumas relações interessantes. Foi observado que em compósitos à base de WC tradicionais, a resistência ao desgaste era proporcional à dureza e dependia ainda do teor em cobalto e do tamanho de grão. Foi concluído que a taxa de desgaste diminui com o aumento de dureza e também com o aumento do tamanho de grão. Por outro lado, um aumento do teor em cobalto provoca uma redução na resistência ao desgaste. Os compósitos nano-estruturados não seguem as relações anteriormente descritas.

A mesma relação entre desgaste e dureza foi constatada por Pirso *et al.* [39] e encontra-se evidenciada na Figura 2.10.

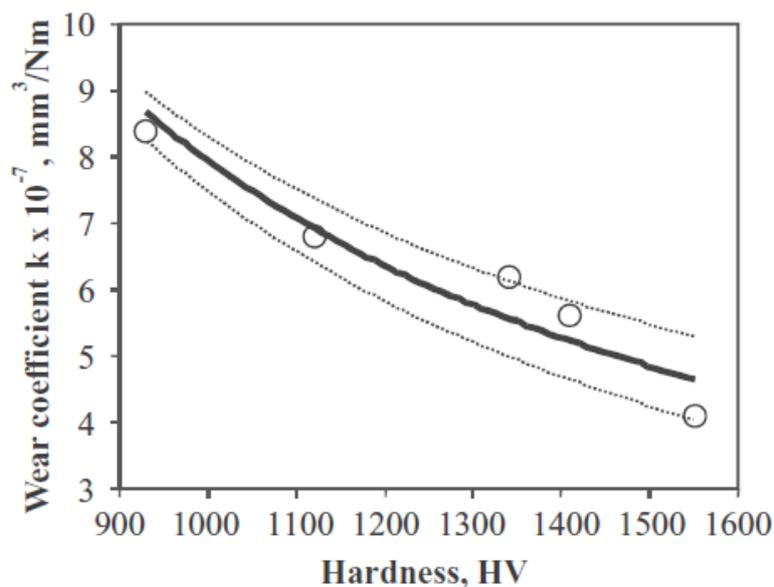


Figura 2.10. Variação do coeficiente de desgaste em função da dureza em vários compósitos à base de WC [39].

Apesar das várias incertezas acerca dos mecanismos pelos quais o desgaste por deslizamento se rege, a forma mais reconhecida pela comunidade científica para a sua previsão é feita a partir da equação proposta por Archard [45]:

$$V = \frac{KSF_N}{H} \quad (2.1)$$

Onde V representa o volume de desgaste, K o coeficiente de desgaste adimensional, S a distância de deslizamento, F_N a força aplicada e H a dureza de Vickers. No entanto, é normalmente usada uma versão desta equação modificada por Czichos [46]:

$$V = KSF_N \quad (2.2)$$

Onde o volume V tem como unidades (mm^3), distância de deslizamento S em (m), força normal F_N em (N) e coeficiente de desgaste em ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Esta versão da equação de Archard permite mais facilmente a comparação entre diferentes materiais uma vez que o coeficiente de desgaste é determinado tendo como base as condições específicas de cada teste.

Dependendo do mecanismo de desgaste predominante, o desgaste por deslizamento pode ser função do tempo de deslizamento ou da distância de deslizamento [37]. As curvas de desgaste em função do tempo ou da distância de deslizamento são ferramentas importantes para caracterizar o progresso do desgaste. Ao analisar estas curvas, três períodos ou regimes distintos podem ser identificados. Estes períodos podem ser vistos na Figura 2.11 (a) onde I corresponde ao período de rodagem, II ao período estável e III ao período de falha. Na Figura 2.11 (b) são apresentadas curvas de desgaste típicas de acordo com o mecanismo de desgaste predominante.

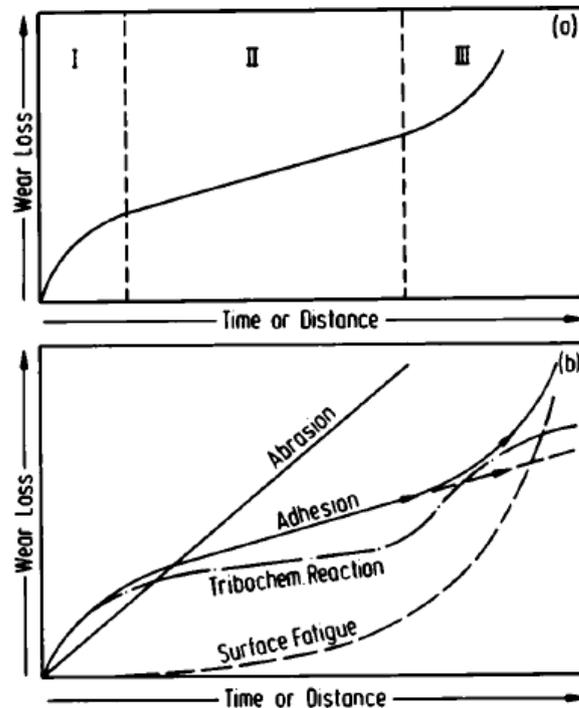


Figura 2.11. Progresso do desgaste em função do tempo ou distância de deslizamento e identificação dos vários regimes (a), Progresso do desgaste em função do tempo ou distância de deslizamento para os diferentes mecanismos predominantes de desgaste (b) [37].

O regime de rodagem é caracterizado pelo aumento progressivo do desgaste com o aumento da distância de deslizamento [37]. Nesta fase o coeficiente de atrito registra também um rápido aumento nos primeiros metros de deslizamento. Este fenómeno foi observado por Pirso *et al.* [40] constatando um súbito aumento do coeficiente de atrito entre os 100 e 300 metros de deslizamento. Segundo o autor, durante o período de rodagem ocorre um processo de desgaste por polimento, diminuindo a rugosidade e eliminando as irregularidades da superfície [40].

Após o período de rodagem e do efeito de polimento que aí se verifica, a pista de desgaste torna-se mais suave levando à estabilização do coeficiente de atrito e do desgaste. No regime estável verifica-se um aumento linear do desgaste com a distância de deslizamento.

Tendo como base vários estudos onde foi investigado o desgaste por deslizamento em compósitos à base de carboneto de tungsténio com fase ligante de cobalto, foram encontrados valores para o coeficiente de atrito entre 0,18 a 0,5 [39], [40], [44].

A informação apresentada teve como objetivo proporcionar uma melhor visão geral acerca dos compósitos à base de carboneto de tungstênio. Foi retratado o compósito WC-Co tradicional e apresentado como alternativo o compósito WC-AISI 304 com fase ligante em aço inoxidável como forma de resolver os problemas que a utilização de cobalto acarreta assim como melhorar propriedades como a resistência à corrosão. Foi dado especial foco às microestruturas, propriedades mecânicas e também propriedades tribológicas destes materiais. Adicionalmente foi discutido o fenômeno do desgaste por deslizamento.

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

Após a revisão bibliográfica focada nos compósitos de WC-Co e WC-SS bem como no desgaste por deslizamento apresentada no capítulo anterior, são agora apresentados neste capítulo os materiais, equipamentos e procedimentos. Este capítulo encontra-se dividido em três subcapítulos.

O primeiro subcapítulo diz respeito aos materiais, onde são apresentadas informações relevantes acerca das amostras usadas assim como dos contra corpos.

O segundo subcapítulo foca-se nos equipamentos utilizados durante os ensaios de desgaste por deslizamento.

O último subcapítulo baseia-se no planeamento, na metodologia adotada para a realização dos ensaios tribológicos e no tratamento de dados.

3.1. Materiais

3.1.1. Amostras

Para a realização dos ensaios experimentais foram selecionados dois tipos de compósitos à base de carboneto de tungsténio, WC-Co e WC-AISI 304, ambos fornecidos pela empresa especializada em metal duro, DURIT – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio. O compósito WC-Co corresponde ao metal duro tradicional enquanto que o WC-AISI 304 tem vindo a ser investigado como potencial alternativa, como forma de substituição do cobalto nestes materiais. As amostras em estudo apresentam forma de disco e são apresentadas na Figura 3.1.

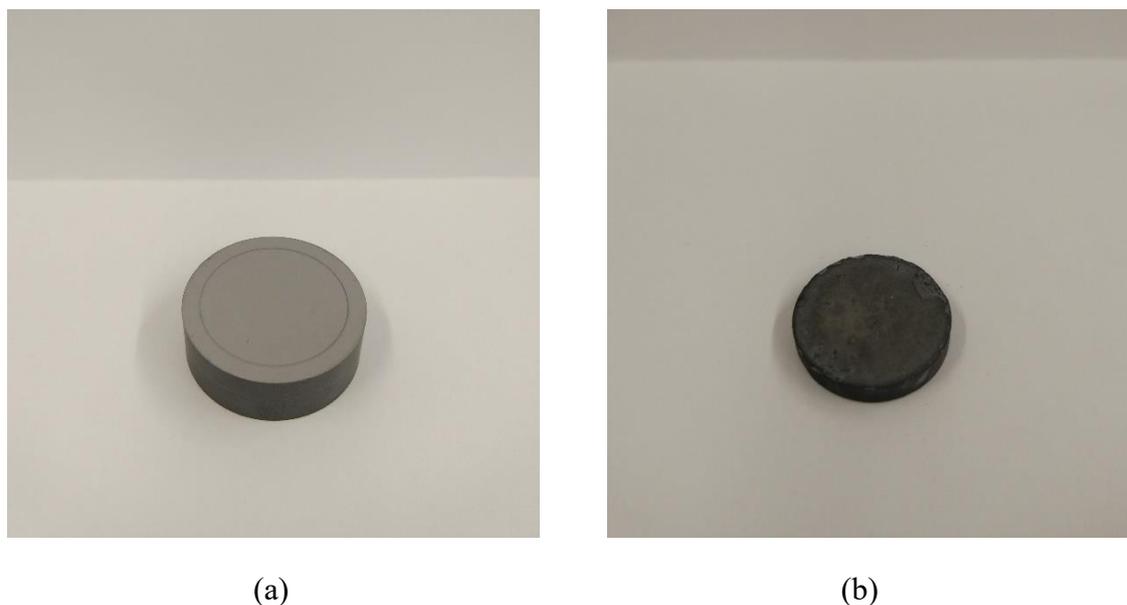


Figura 3.1. Amostra de WC-Co (a) e amostra de WC-AISI 304 (b)

Nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2 são explicitadas as dimensões e composição das amostras em estudo, respetivamente.

Tabela 3.1. Dimensões das amostras de WC-Co e WC-AISI 304.

	WC-Co	WC-AISI 304
Diâmetro (mm)	29	20
Espessura (mm)	10	4

Tabela 3.2. Composição das amostras de WC-CO e WC-AISI 304.

	WC (% pond)	Co (% pond)	SS AISI 304 (% pond)
WC-Co	90	10	-
WC-SS	90	-	10

De forma a efetuar os testes tribológicos com o maior rigor possível e diminuir eventuais erros de medição, é indispensável que a face da amostra na qual se realiza o ensaio apresente um bom acabamento superficial, isto é, que se encontre perfeitamente polida, livre de defeitos e nivelada.

Uma vez que as amostras não apresentavam o acabamento superficial requerido foi necessário prepará-las no laboratório do DEM – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

As amostras de WC-Co foram submetidas a um processo de polimento da superfície sendo para isso utilizado o equipamento *Struers LaboPol-5* com recurso a pasta diamantada de granulometria de 6 µm.

Em relação às amostras de WC-AISI 304, dada a existência de grandes defeitos à superfície, foram utilizados vários processos. Numa primeira fase, devido à reduzida dimensão das amostras, estas foram colocadas em suportes de resina de modo a facilitar o seu manuseamento. Na segunda fase, usando lixas de diferentes granulometrias no equipamento *Struers LaboPol-5* foi possível remover os defeitos superficiais das amostras. Por último, as faces das amostras WC-AISI 304 foram polidas com a mesma técnica aplicada nas amostras de WC-Co.

Terminada a preparação das amostras, foi avaliada a rugosidade superficial. Para isso, foram realizados três testes em cada face preparada, com acabamento “tipo espelho”, usando o instrumento *Mitutoyo Suftest 402*. Todas as amostras exibiram uma rugosidade média R_a igual ou inferior a 0,02 µm, o que indica uma rugosidade superficial bastante reduzida.

No decorrer deste trabalho os compósitos de WC-AISI 304 serão identificados como WC-SS.

3.1.2. Contra Corpos

De modo a ser também possível estudar a influência do material do contra corpo em ensaios de deslizamento, foram selecionados dois materiais com características distintas, um de natureza metálica e um segundo de natureza cerâmica.

O aço AISI L3 trata-se do contra corpo metálico em estudo. Este é um aço de baixa liga martensítico, com elevadas dureza e resistência ao desgaste, bom acabamento superficial assim como precisão dimensional. Apresenta uma dureza compreendida entre 60 a 66 HRC - escala de Rockwell C, o que corresponde ao intervalo 700 - 860 na escala de Vickers. [47].

O contra corpo cerâmico utilizado foi a alumina - Al_2O_3 . Este material cerâmico também é caracterizado pelas elevadas dureza e resistência ao desgaste. De acordo com a

literatura a dureza encontra-se normalmente numa gama de 15 a 16 GPa, correspondendo ao intervalo 1530 – 1630 na escala de Vickers [48].

No que às dimensões diz respeito, ambos apresentam forma esférica com 6 milímetros de diâmetro. A forma esférica do contra corpo é benéfica no sentido em que evita desalinhamentos durante a realização dos ensaios de deslizamento e ao mesmo tempo é responsável por elevadas pressões de contacto.

As esferas dos dois materiais em questão exibiam boa qualidade superficial, não sendo possível observar qualquer tipo de defeitos à superfície e por isso não foram realizados processos de melhoramento da qualidade da superfície.

Na Figura 3.2 é possível observar os dois tipos de esferas usadas como contra corpo nos ensaios de deslizamento não lubrificado.

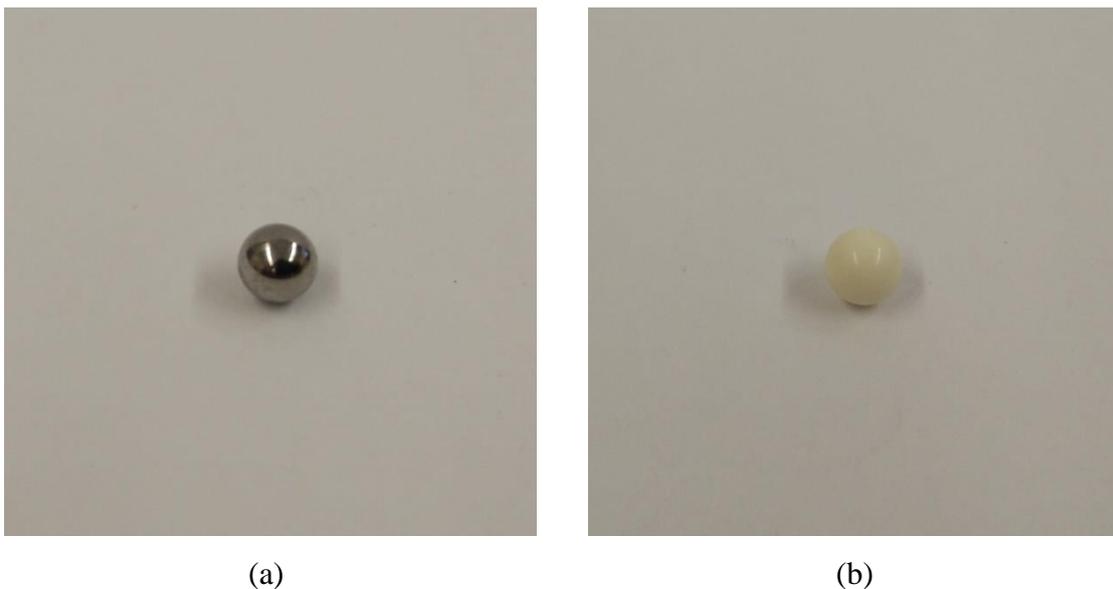


Figura 3.2. Esfera de AISI L3 (a) e esfera de Al₂O₃ (b).

3.2. Equipamentos

3.2.1. Tribómetro

O tribómetro é um instrumento que permite a realização de ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento. Para a realização deste trabalho, foi utilizado um tribómetro construído no DEM baseado num torno mecânico *Einhell BT-ML 300*, como ilustrado na Figura 3.3. Este equipamento foi projetado para uma configuração pino e disco, o que possibilita a execução de ensaios de desgaste por deslizamento unidirecional, não lubrificados, de acordo os requisitos estabelecidos pela norma ASTM G99.

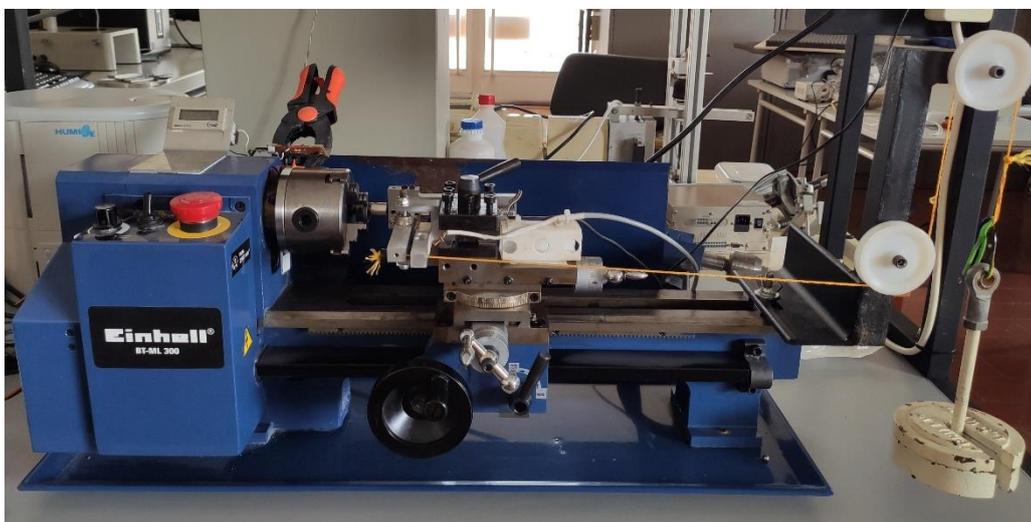


Figura 3.3. Tribómetro Pino e Disco utilizado nos ensaios tribológicos.

No método pino e disco, um disco em rotação em torno do seu eixo é posto em contacto com um pino estacionário, seguindo um deslocamento unidirecional no qual é aplicada uma força normal. Na Figura 3.4 encontra-se esquematizado este processo.

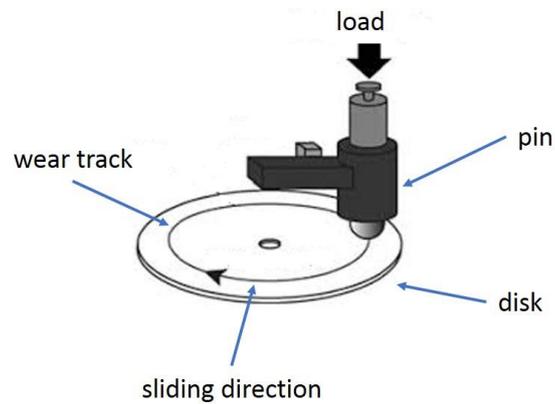


Figura 3.4. Esquematização do Método Pino e Disco [49].

Neste estudo foram utilizadas como disco amostras de WC-Co e WC-SS, enquanto que as esferas de AISI L3 e Al_2O_3 correspondem ao pino, também designado como contra corpo.

A montagem dos discos é feita através de mordentes existentes na cabeça giratória do equipamento que permite a fixação dos discos durante os ensaios, como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5. Mecanismo de fixação dos discos no tribômetro.

No caso das esferas, estas são encaixadas num suporte cónico e por sua vez, este é fixo ao tribómetro com recurso a um parafuso. O mecanismo de fixação do contra corpo é ilustrado na Figura 3.6.

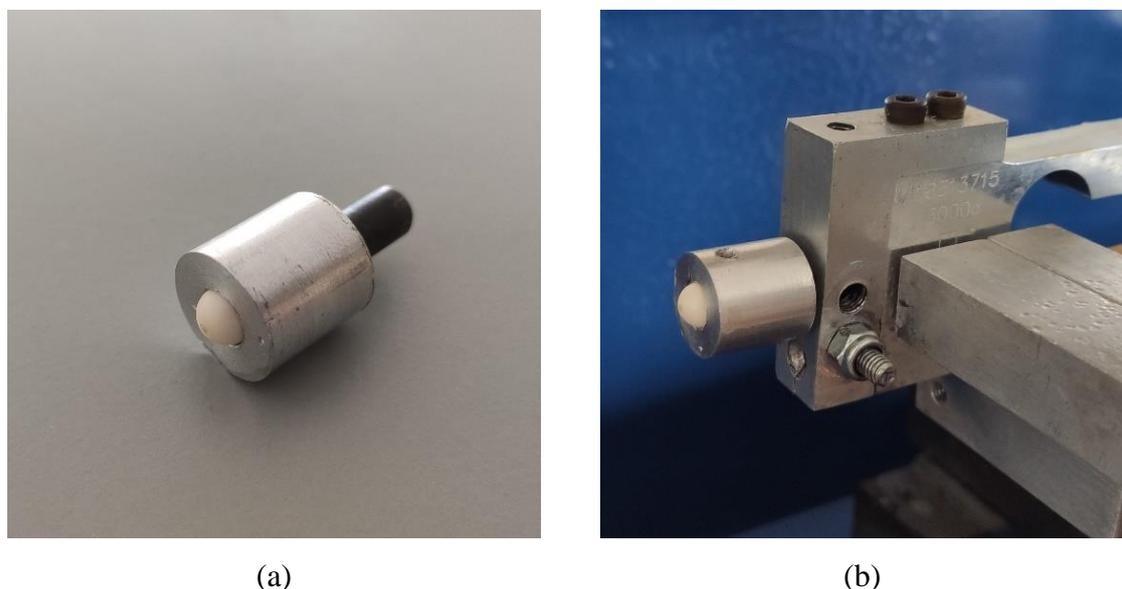


Figura 3.6. Suporte cónico para fixação do contra corpo (a) e montagem do suporte no tribómetro (b).

O tribómetro permite regular um conjunto de parâmetros de forma a ser possível definir as condições do ensaio. A velocidade de rotação do disco, dada em rotações por minuto (rpm), pode ser controlada através de um botão potenciómetro. O raio da pista de desgaste é definido antes de cada ensaio mediante regulação de uma manivela de ajuste micrométrico.

A carga normal aplicada na esfera é garantida através de um peso suspenso ligado ao mecanismo de fixação do contra corpo por intermédio de um cordel. Esta montagem assegura que a carga é constante ao longo de todo o ensaio.

Com o intuito de monitorizar o atrito ao longo dos testes tribológicos, foi associado um controlador ao tribómetro e este ligado a um computador onde foi desenvolvida uma interface no *software LabView 8*, representada na Figura 3.7.

No início de cada teste, são inseridas no programa as seguintes variáveis: duração do ensaio (s), velocidade de rotação (rpm) e força normal (N).

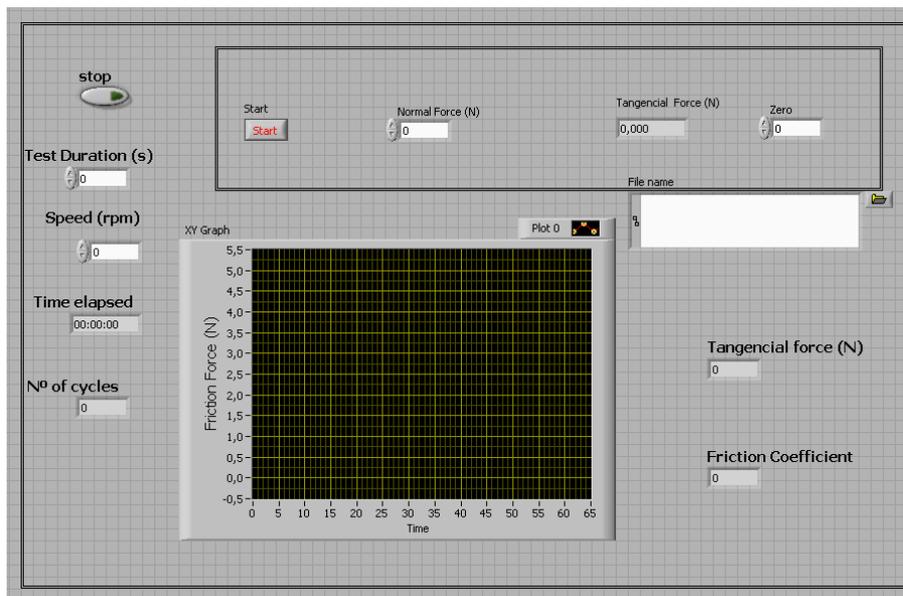


Figura 3.7. Interface do Software LabView 8.

Uma célula de carga transversal instalada no equipamento fornece ao programa o valor da força transversal em cada instante. A partir da força normal inserida pelo utilizador, constante ao longo do ensaio, e dos dados recolhidos pela célula de carga transversal, o *software* efetua o cálculo do coeficiente de atrito instantâneo e apresenta também o gráfico da força de atrito em função do tempo decorrido de ensaio.

A cada segundo decorrido de ensaio são gravados num ficheiro os valores de tempo, força normal e força transversal. Estes dados são usados posteriormente para estudar a evolução do atrito ao longo do teste tribológico.

3.2.2. Perfilómetro

O perfilómetro é um instrumento de medida que permite caracterizar com elevada precisão a superfície de um material. Para determinar o volume de material desgastado dos discos de WC-Co e de WC-SS resultante dos ensaios tribológicos recorreu-se ao perfilómetro *Mitutoyo SurfTest SJ-500*.

O equipamento possui um braço extensível e, na sua extremidade, uma ponta afiada em cerâmica. Os discos são colocados sobre a plataforma do perfilómetro de forma a que a ponta em cerâmica percorra transversalmente a superfície da pista de desgaste durante o seu movimento. O aparato descrito é representado na Figura 3.8.



Figura 3.8. Disco de WC-Co colocado sobre a plataforma do perfilómetro.

Este instrumento encontra-se conectado a um computador e é controlado através do *software Formtracepak*. O programa apresentado permite, a partir dos dados obtidos durante o varrimento da superfície da pista, gerar perfis bidimensionais da secção transversal da pista de desgaste. Os perfis bidimensionais obtidos são posteriormente integrados numericamente sendo então possível determinar o volume de desgaste do disco.

Na Figura 3.9 pode ser vista a interface do programa mencionado, onde está presente um perfil bidimensional obtido na direção transversal da pista de desgaste do compósito de WC-SS.

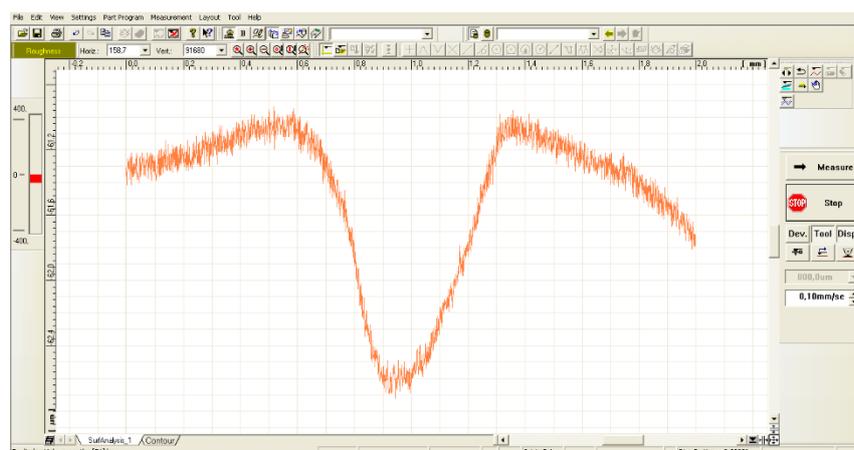


Figura 3.9. Interface do software Formtracepak com um perfil transversal da pista de desgaste do compósito WC-SS.

3.2.3. Microscópio Ótico

As interações tribológicas resultantes do contacto entre superfícies em movimento relativo provocam desgaste. Este desgaste não ocorre somente no disco, mas também no contra corpo esférico.

De modo a determinar o volume de desgaste do contra corpo foi feita uma aproximação deste ao volume de uma calota esférica. Este volume determina-se a partir do diâmetro da marca de desgaste circular deixada no contra corpo, que corresponde ao diâmetro da base da calota esférica.

Para minimizar o erro de aproximação, são medidos dois diâmetros, em duas direções perpendiculares entre si, sendo utilizado para isso o microscópio ótico *Mitutoyo Toolmarker's Microscopes*, ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10. Microscópio ótico Mitutoyo Toolmarker's Microscopes.

Este instrumento permite uma magnificação de 15 vezes e é dotado de retroiluminação para uma melhor análise das amostras.

Uma plataforma móvel segundo dois eixos perpendiculares entre si, equipada com dois micrómetros digitais permite realizar a medição dos dois diâmetros anteriormente referidos.

Posteriormente é apresentada a metodologia seguida para determinar o volume de desgaste das esferas com base nos diâmetros medidos.

3.2.4. Microscópio Ótico com Máquina Fotográfica

Algumas marcas de desgaste do contra corpo de alumina não puderam ser analisadas usando o microscópio ótico descrito anteriormente, uma vez que, devido à falta de contraste e refletividade da superfície, não era possível efetuar as medições necessárias.

Por esta razão, as marcas de desgaste descritas foram estudadas com recurso ao Microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ* com máquina fotográfica *Cannon PowerShot A620* associada.

Usando este equipamento foi possível fotografar a zona circular de desgaste e, através de uma comparação com uma escala, determinar os respetivos diâmetros.

Na Figura 3.11 pode-se observar a marca de desgaste deixada na esfera de alumina resultante do contacto tribológico com o composto WC-Co.

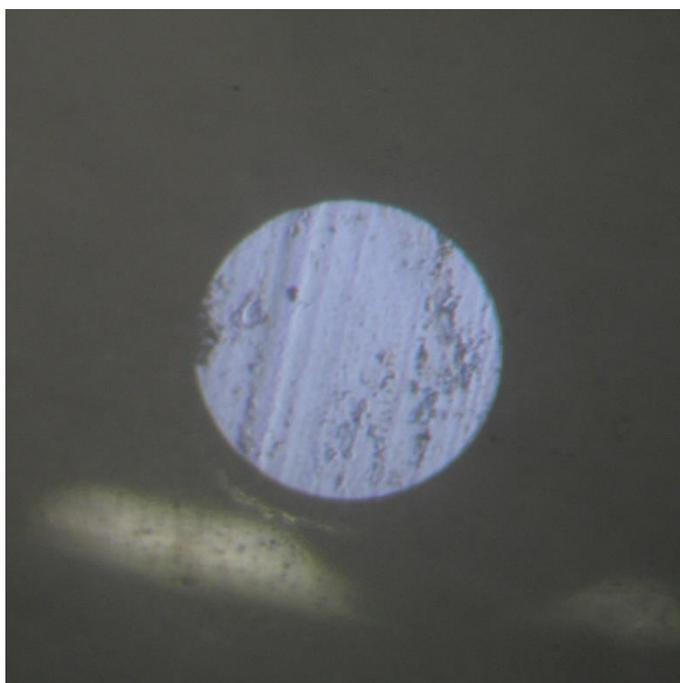


Figura 3.11. Marca de desgaste no contra corpo de alumina.

3.2.5. Microscópio Eletrônico de Varrimento

Com o intuito de estudar com maior pormenor a pista de desgaste dos discos de compósito à base de carboneto de tungstênio de modo a aferir sobre o mecanismo de desgaste, bem como partículas recolhidas da superfície da mesma, foi utilizado o microscópio eletrónico de varrimento *Philips XL30*, apresentado na Figura 3.12.



Figura 3.12. Microscópio eletrónico de varrimento *Philips XL30*.

3.3. Procedimentos

3.3.1. Medição da Dureza e Tenacidade à Fratura

De forma a avaliar as propriedades mecânicas das amostras de WC-Co e WC-SS foram determinadas as suas dureza e tenacidade à fratura.

A dureza foi determinada a partir do teste de indentação de Vickers com recurso ao *Zwick/Roell ZHU*. Os testes foram realizados com uma carga HV30 correspondendo a 30 Kg (294 N), aplicada durante 15 segundos.

A dureza expressa em HV pode ser determinada a partir do quociente entre a carga aplicada pelo indentador (P) e a área de indentação (A_{ind}) como mostra a equação (3.1):

$$HV = \frac{P}{A_{ind}} = \frac{1,8544 P}{D_{ind}^2} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), D_{ind} corresponde ao valor em milímetros da média das duas diagonais de indentação e 136° ao ângulo entre faces opostas da pirâmide quadrangular.

Para a realização dos ensaios foram selecionadas aleatoriamente uma das amostras de WC-Co e outra de WC-SS e realizados cinco testes em cada uma delas, sendo os resultados obtidos a média das várias medições.

Para a determinação da tenacidade à fratura foi utilizado o método de Palmqvist. Este método permite quantificar a tenacidade à fratura através do fator K_{IC} com base no comprimento das fissuras formadas durante o teste de indentação de Vickers. Este factor pode ser calculado com base na equação (3.2) sugerida por Shetty *et al.* [50].

$$K_{IC} = 0.0889 * \sqrt{H} \sqrt{\frac{P}{\Sigma l}} \quad (3.2)$$

Onde H representa a dureza em Pascal (Pa), P a carga usada em Newton (N) e Σl o somatório do comprimento das fissuras, expresso em metros (m).

Também na medição da tenacidade à fratura foram obtidos cinco valores para cada compósito, sendo os resultados à frente apresentados a média dos mesmos.

3.3.2. Planeamento dos Ensaios

Em ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento unidirecional não lubrificado são vários os parâmetros que devem ser tidos em consideração, visto que influenciam a evolução do atrito e do desgaste.

Após a análise de vários estudos sobre este tipo de desgaste é possível perceber que os fatores de maior importância são: a velocidade de deslizamento, a carga normal aplicada e o tempo.

Os ensaios de desgaste por deslizamento são realizados utilizando uma vasta gama de cargas normais, desde 2 N, chegando por vezes a ser empregues cargas de 180 N. O mesmo acontece para a velocidade de deslizamento, sendo usadas velocidades tão baixas como 0,03 m/s até 7,9 m/s [39], [40], [42], [44], [51].

O principal objetivo deste trabalho é a caracterização tribológica dos compósitos de WC-Co e WC-SS e não tanto, o estudo da influência da variação das condições dos ensaios. Assim, os parâmetros velocidade de deslizamento e carga normal aplicada mantiveram-se constantes ao longo de todos os testes.

Para este estudo foram selecionadas condições de desgaste leve, o que significa baixa carga normal aplicada assim como baixa velocidade de deslizamento. Desta forma, foram definidas uma velocidade linear de deslizamento de 0,25 m/s e uma carga normal aplicada de 20 N constantes em todos os testes.

Na presente dissertação foram avaliados quatro sistemas tribológicos. Estes sistemas são formados pelos compósitos à base de carboneto de tungsténio WC-Co e WC-SS combinados com os contra corpos AISI L3 e Al₂O₃. Na Tabela 3.3 são identificados os referidos sistemas.

Tabela 3.3. Identificação dos sistemas tribológicos em estudo.

	Disco	Contra Corpo
Sistema A	WC-Co	AISI L3
Sistema B	WC-Co	Al ₂ O ₃
Sistema C	WC-SS	AISI L3
Sistema D	WC-SS	Al ₂ O ₃

Como mencionado anteriormente, um dos fatores de parâmetros fundamentais no desgaste por deslizamento é o fator tempo, que se traduz em número de rotações ou distância de deslizamento. A evolução do atrito e do desgaste encontra-se fortemente ligada a este fator. Assim sendo, com o intuito de compreender o desenvolvimento do atrito e desgaste, para cada sistema em estudo foram realizados vários testes com diferente número de rotações.

A execução de diversos ensaios para cada sistema permite determinar com maior rigor o coeficiente de desgaste para cada um dos materiais envolvidos.

Outros parâmetros importantes a ter em consideração são a temperatura e a humidade relativa do ambiente circundante. Dada a impossibilidade de monitorizar estes parâmetros ao longo de cada ensaio, foi feita a leitura destes parâmetros no início de cada ensaio.

O planeamento dos ensaios foi definido de forma a compreender a evolução do atrito e do desgaste nos WC-Co e WC-SS em função do tempo, bem como estudar a interação dos compósitos à base de WC em deslizamento relativo com outros materiais de elevada dureza de diferentes naturezas.

3.3.3. Procedimento Experimental

O procedimento experimental começou com a limpeza das amostras e do contra corpo sendo para isso utilizado um equipamento de ultrassons, de forma a eliminar algum tipo de contaminação que estes possam conter.

De seguida procedeu-se à montagem das mesmas nos respetivos suportes do tribómetro pino e disco. Foi definida a velocidade de rotação do equipamento, assim como a distância entre o centro de rotação do disco e o centro da esfera de modo garantir a velocidade linear desejada. O contra corpo foi então encostado ao disco e pendurado o peso que garante a força normal aplicada.

No computador, através do *software LabView 8*, foi primeiramente verificada a correta leitura dos valores da célula de carga transversal. Assegurado o bom funcionamento da célula de carga, foram inseridos na interface os valores: tempo de duração do ensaio (s), velocidade de rotação do tribómetro (rpm) e carga normal (N). O tempo de duração de cada ensaio é previamente calculado para um determinado número de rotações com base na velocidade de rotação do equipamento e na distância entre o centro de rotação do disco e o

centro da esfera. O início do teste tribológico realizou-se através do acionamento do botão Start disponível na interface do programa mencionado.

Terminado o teste, foi retirado o peso suspenso e afastado o contra corpo do disco de forma a ser possível a desmontagem dos mesmos.

Seguidamente, o contra corpo foi retirado do tribómetro, limpo com recurso a álcool etílico e realizadas medições no microscópio da zona de desgaste.

Posto isto, procedeu-se à desmontagem do disco e retirada uma amostra das partículas da superfície da pista de desgaste, sendo para isso usada fita adesiva. Posteriormente foi realizada a limpeza do disco, também com recurso a álcool etílico, e gerados perfis bidimensionais da secção transversal da pista de desgaste através de perfilometria.

No último passo, foram recolhidos os dados provenientes do tribómetro para a caracterização do atrito e também os perfis obtidos no perfilómetro para o cálculo do volume de desgaste nas amostras.

Todos os ensaios tribológicos realizados seguiram esta metodologia com exceção de um ensaio em que o disco não foi limpo após a realização do teste de modo a permitir a observação, em SEM, do material depositado na superfície resultante do desgaste.

Adicionalmente, as amostras de partículas recolhidas da superfície da pista de desgaste assim como algumas pistas de desgaste dos discos foram analisadas através de microscopia ótica de varrimento. No caso das amostras de partículas, foi necessário revesti-las a ouro/platina mediante técnicas de deposição catódica.

De realçar que todo o processo experimental da presente dissertação foi realizado nos laboratórios do DEM.

Nos próximos subcapítulos são apresentadas em detalhe as metodologias seguidas no tratamento de dados no que diz respeito ao volume de desgaste do disco, volume de desgaste do contra corpo e à caracterização do atrito.

3.3.4. Volume da Pista de Desgaste

Durante os ensaios de deslizamento pino e disco, devido às interações tribológicas resultantes do contato entre o disco em rotação e o pino estático, é produzido desgaste. A perda progressiva de material no disco gera uma pista, de geometria anelar,

relativamente uniforme ao longo do seu perímetro. Na Figura 3.13 é esquematizada a pista de desgaste formada neste tipo de ensaios.

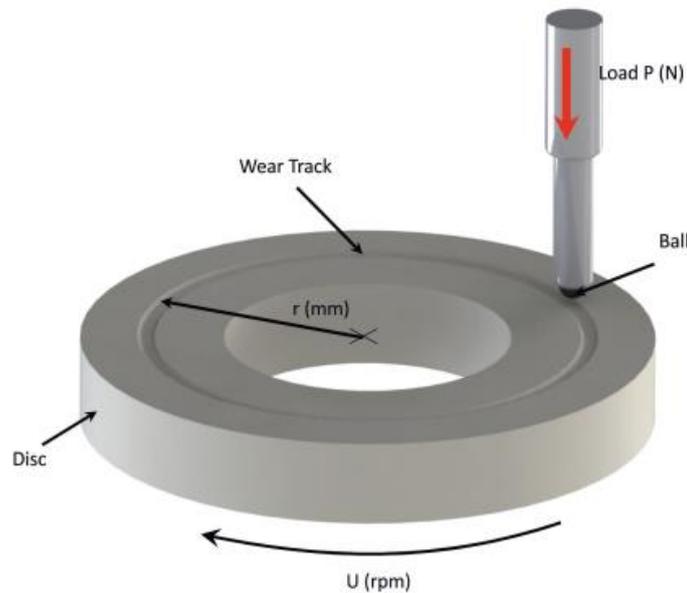


Figura 3.13. Esquematização da pista de desgaste formada nos ensaios pino e disco [52].

A determinação do volume da pista de desgaste tem como base perfis bidimensionais, transversais à pista de desgaste, obtidos através de perfilometria.

As técnicas de perfilometria permitem leituras de elevada precisão. No entanto, para o posterior cálculo do volume, uma simplificação importante é assumida: considerar a secção transversal da pista constante ao longo do seu perímetro. Assim, de forma a minimizar o erro obtido por esta simplificação, para cada pista em análise foram produzidos três perfis bidimensionais.

Seguidamente à obtenção dos perfis passou-se ao tratamento dos mesmos, sendo para isso utilizado o software *Microsoft Excel*. Numa primeira instância, utilizando esta ferramenta, procedeu-se ao nivelamento dos perfis sobre o eixo das abcissas. Numa segunda fase foi aplicada uma média móvel de 15 valores de forma a suavizar flutuações pontuais existentes nos perfis.

Pode ser contemplado na Figura 3.14 um perfil de desgaste tratado segundo os métodos descritos. De realçar, que a área transversal da pista de desgaste corresponde à área da região negativa presente no centro do gráfico.

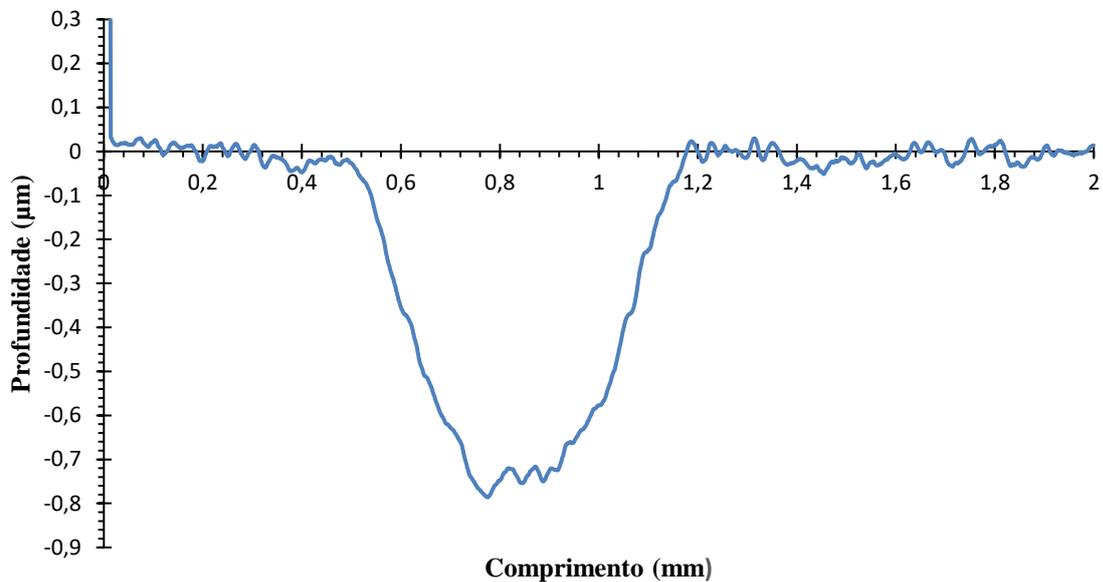


Figura 3.14. Perfil transversal de uma pista de desgaste nivelado e suavizado.

Tendo isto em conta, volume da pista de desgaste é determinado com base na equação 3.3:

$$V_p = 2\pi r_p A_p \quad (3.3)$$

Onde r_p (mm) representa o raio da pista de desgaste, correspondente à distância entre o centro de rotação do disco e o centro da esfera, utilizada durante o ensaio tribológico. A_p (mm²) corresponde à área transversal da pista de desgaste.

Esta área é determinada pela integração numérica da região central negativa do perfil, por intermédio do programa *Microsoft Excel*. De destacar que a área usada para o cálculo do volume na equação (3.3), A_p , corresponde à média aritmética de três áreas obtidas pelo tratamento dos três perfis bidimensionais criados para cada pista.

3.3.5. Volume de Desgaste do Contra Corpo

Como explicado anteriormente, a fim de determinar o volume de desgaste do contra corpo, assume-se uma aproximação ao volume de uma calota esférica. Este volume é ilustrado a azul na Figura 3.15.

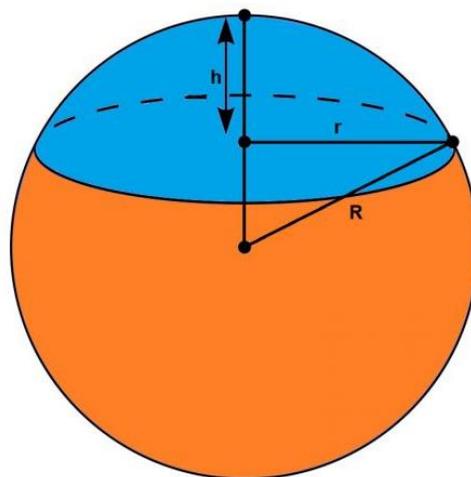


Figura 3.15. Representação de uma calota esférica [53].

Numa primeira fase foram medidos dois diâmetros perpendiculares entre si, sendo para isso utilizados o microscópio ótico *Mitutoyo Toolmarker's Microscopes* e, para alguns casos, o microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ* com máquina fotográfica.

Na segunda fase determinou-se a altura da calota esférica com recurso à equação (3.4):

$$h_c = R - \sqrt{R^2 - (r_c)^2} \quad (3.4)$$

Onde h_c (mm) representa a altura da calota, R (mm) o raio da esfera utilizada como contra corpo no ensaio e r_c (mm) o raio da base da calota.

O raio da base da calota foi calculado a partir da média aritmética dos dois diâmetros medidos.

Na última fase foi determinado o volume de desgaste do contra corpo através da equação (3.5):

$$V_{cc} = V_c = \frac{\pi}{3} (h_c)^2 (3R - h_c) \quad (3.5)$$

3.3.6. Coeficiente de Desgaste

A previsão do desgaste por deslizamento é normalmente realizada tendo por base a equação proposta por Archard expressa na equação (3.6):

$$V = \frac{KSF_N}{H} \quad (3.6)$$

Posteriormente, Czichos sugere a simplificação apresentada na equação (3.7):

$$V = KSF_N \quad (3.7)$$

A modificação proposta por Czichos é consideravelmente mais simples, o que explica o facto de ser largamente utilizada. Nesta versão, não é considerada a dureza do material. V (mm^3) representa o volume de desgaste, K ($\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$) o coeficiente de desgaste, S (m) a distância de deslizamento e F_N (N) a força normal.

Reorganizando a equação (3.7) de forma a isolar o coeficiente de desgaste obtém-se a equação (3.8):

$$K = \frac{V}{SF_N} \quad (3.8)$$

O coeficiente de desgaste traduz o volume de desgaste de um material para uma dada distância de deslizamento e força normal.

A distância de deslizamento pode ser expressa pela equação (3.9):

$$S = 2\pi r_p N \quad (3.9)$$

Onde S representa a distância de deslizamento para um determinado ensaio, em função do raio da pista de desgaste r_p (m) e do número de rotações do ensaio N .

Uma vez que todas as variáveis são conhecidas, torna-se possível determinar o coeficiente de desgaste tanto para os discos como para os contra corpos.

Para isso, para cada disco e contra corpo dos quatro sistemas em estudo foram produzidos gráficos de dispersão onde foram identificados os pontos correspondentes ao volume de desgaste em função da severidade.

A severidade é definida como o produto entre a distância de deslizamento e a força normal aplicada.

De forma a relacionar as variáveis mencionadas, para cada gráfico de dispersão construído, foi aplicada uma equação de regressão linear. O declive da reta de regressão linear corresponde ao coeficiente de desgaste do material.

Na Figura 3.16 é apresentado um dos gráficos obtidos para um disco. É possível observar a reta de regressão linear baseada nos quatros pontos do gráfico bem como a sua equação. Neste exemplo o coeficiente de desgaste obtido tem o valor de $K=2,854E-07$ $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

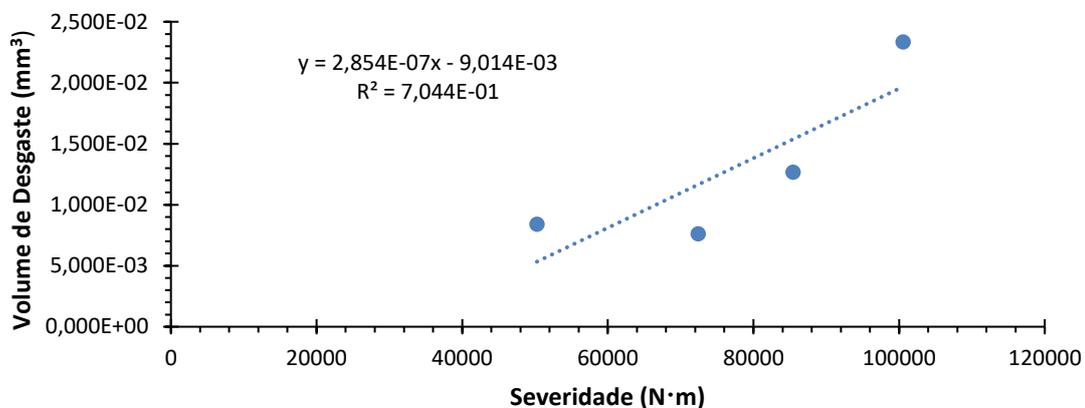


Figura 3.16. Coeficiente de desgaste de um dos discos.

3.3.7. Caracterização do Atrito

O atrito é um parâmetro de larga importância em estudos de desgaste por deslizamento. Este pode ser interpretado como a força que se opõe ao movimento relativo entre corpos. O seu comportamento encontra-se intimamente relacionado com a qualidade superficial e tipo dos materiais em contacto e ainda com as condições do meio envolvente.

A partir dos dados recolhidos no tribómetro, que fornecem os valores da força transversal e sabendo que a força normal é constante nos ensaios, pode determinar-se o coeficiente de atrito instantâneo. Este é dado pelo coeficiente entre a força transversal e a força normal verificadas num determinado momento, como mostra a equação (3.10):

$$\mu_{inst} = \frac{F_T}{F_N} \quad (3.10)$$

Determinando os coeficientes de atrito instantâneo para todos os instantes do ensaio, sendo para isso utilizado o software Microsoft Excel, e apresentando-os em gráfico em função do tempo são obtidas as curvas de atrito.

Estas curvas são fundamentais para a compreensão da evolução do atrito ao longo de um ensaio tribológico. Assim, foram produzidas curvas de atrito para todos os ensaios dos sistemas em estudo como forma de caracterizar o atrito num determinado conjunto de condições específicas.

De forma a minimizar a influência de flutuações pontuais de valores nas curvas de atrito, provocadas por variações momentâneas do meio envolvente e condições de contacto entre os corpos, foi aplicada uma média móvel de 50 valores ao coeficiente de atrito. Na Figura 3.17 é apresentada uma das curvas de atrito obtidas.

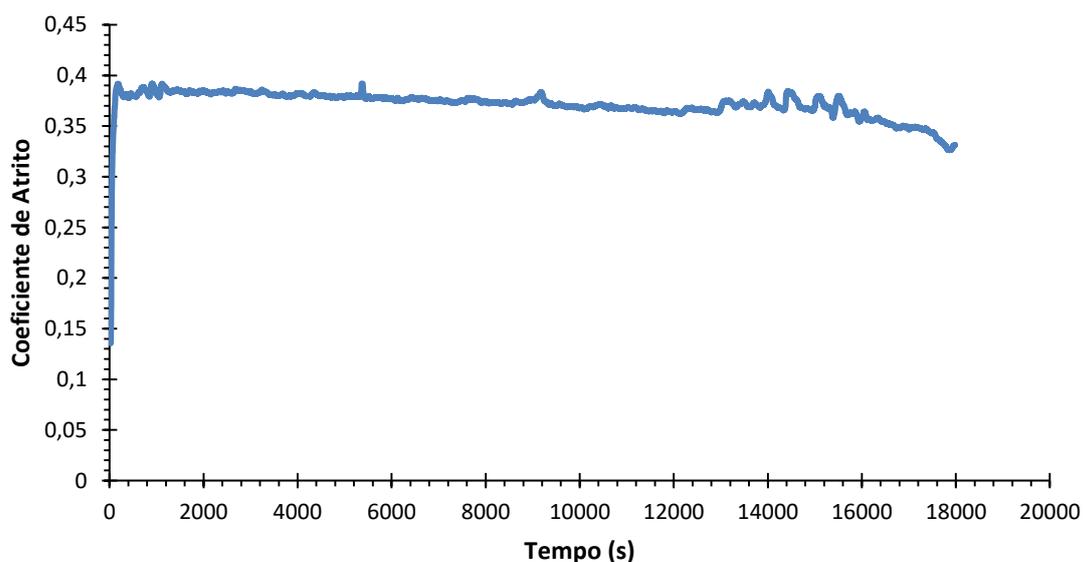


Figura 3.17. Exemplo de uma curva de atrito suavizada de um ensaio tribológico.

O coeficiente de atrito médio foi também determinado de modo a contribuir para a caracterização do atrito. Para isso é aplicada a média aritmética ao conjunto dos coeficientes de atrito instantâneos, como demonstra a equação (3.11):

$$\mu_{med} = \frac{\sum \mu_{inst}}{n_{\mu_{inst}}} \quad (3.11)$$

Este coeficiente permite obter uma visão geral do coeficiente de atrito verificado para um determinado teste.

Por fim, de modo a complementar o cálculo do coeficiente de atrito médio procedeu-se à determinação da sua variação através do cálculo do desvio padrão, expresso pela equação (3.12):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\mu_{inst} - \mu_{med})^2}{n_{\mu_{inst}}}} \quad (3.12)$$

3.3.8. Correlação com as Propriedades Mecânicas

De modo a avaliar a dependência entre as propriedades tribológicas e as propriedades mecânicas dos compósitos em estudo recorreu-se ao coeficiente de Evans.

Segundo Evans et al. [54] o coeficiente de desgaste de um material cerâmico é proporcional à expressão explicitada na equação (3.13):

$$K = F_N^{\frac{9}{8}} \times K_{IC}^{-\frac{1}{2}} \times H^{-\frac{5}{8}} \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (3.13)$$

Onde F_N (N) corresponde à força normal aplicada no ensaio tribológico, K_{IC} ($\text{MPam}^{1/2}$) à tenacidade à fratura, H (kgf/mm^2) à dureza e E (GPa) ao módulo de Young.

Apesar dos compósitos de WC-Co e WC-SS não serem materiais puramente cerâmicos, de acordo com Fernandes *et al.* [4], devido ao fato do WC-Co exibir pouca ou nenhuma deformação plástica e do WC-SS apresentar tanto baixa resistência à flexão como presença de fase eta que contribui para o aumento da fragilidade do material, ambos os materiais podem ser considerados como cerâmicos pelo comportamento que apresentam. Desta forma, o uso deste coeficiente torna-se adequado para os materiais em análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este quarto capítulo encontra-se dividido em dois subcapítulos. No primeiro são expostos os resultados obtidos, tendo como base as metodologias de medição e cálculo anteriormente descritas. No segundo, realiza-se a discussão dos resultados apresentados.

No subcapítulo resultados, numa primeira fase, apresentam-se os resultados obtidos pela medição das propriedades mecânicas, tais como, dureza e tenacidade à fratura. Seguidamente, são evidenciados em detalhe os resultados relativos ao desgaste e atrito relativo ao sistema tribológico A. Para os restantes sistemas foi seguida a mesma metodologia do sistema A, encontrando-se os resultados expostos nos apêndices A, B e C. Posteriormente, foi realizada uma comparação global entre os sistemas tribológicos em estudo. Foram ainda realizadas comparações parciais entre os sistemas A e B e entre os sistemas C e D, estado estas expostas nos apêndices D e E, respetivamente.

4.1. Resultados

4.1.1. Dureza e Tenacidade à Fratura

No seguimento dos testes de dureza Vickers e tenacidade à fratura pelo método de Palmqvist às amostras de WC-Co e WC-SS são agora apresentados os resultados obtidos pelas mesmas.

Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos nos testes relativos à amostra de WC-Co e WC-SS respetivamente.

Tabela 4.1. Resultados dos testes de dureza Vickers e tenacidade à fratura pelo método de Palmqvist – amostra WC-Co.

	Teste	HV30 (Kgf/mm ²)	K _{IC} (MPa·m ^{1/2})
WC-Co	1	1494,65	9,96
	2	1510,70	10,02
	3	1537,38	10,24
	4	1458,69	10,48
	5	1451,89	7,71

Tabela 4.2. Resultados dos testes de dureza Vickers e tenacidade à fratura pelo método de Palmqvist – amostra WC-SS.

	Teste	HV30 (Kgf/mm ²)	K _{IC} (MPa·m ^{1/2})
WC-SS	1	1555,19	7,69
	2	1536,26	7,84
	3	1551,42	7,91
	4	1511,74	7,31
	5	1554,48	8,15

Por fim, foi determinada, a partir dos resultados dos testes, a média aritmética e desvio padrão das duas propriedades mecânicas das amostras em estudo. Estes dados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Dureza e tenacidade à fratura das amostras de WC-Co e WC-SS.

Amostra	Dureza (Kgf/mm ²)		Tenacidade à Fratura (Mpa·m ^{1/2})	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
WC-Co	1491	36	9,7	1,1
WC-SS	1542	18	7,8	0,3

4.1.2. Sistema A

O sistema A é composto por um disco de WC-Co e uma esfera de aço AISI L3. Na Tabela 4.4 são apresentadas as condições dos quatros ensaios realizados para este sistema tribológico.

Tabela 4.4. Condições dos ensaios do Sistema A.

Ensaio	Nº Rotações	Severidade (N·m)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
E1	36000	54287	22	43
E2	50000	62832	21	33
E3	72000	90478	21	35
E4	100000	125664	21	35

Dado que as condições do meio envolvente podem influenciar os resultados dos testes tribológicos, na Tabela 4.4 foram incluídas as medições de temperatura e humidade

relativa no início de cada ensaio. O conjunto de ensaios do sistema A foram realizados segundo uma temperatura média de 21,3 °C, humidade relativa média de 36.5 % e variação de humidade relativa de ± 10 %.

4.1.2.1. Volume das Pistas de Desgaste

Após a medição das áreas transversais das pistas de desgaste e posterior integração numérica das mesmas, são apresentados na Tabela 4.5 os volumes das pistas de desgaste (V_p) e severidade correspondentes a cada ensaio realizado.

Tabela 4.5. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema A.

Ensaio	V_p (mm ³)	Severidade (N·m)
E1	8,482E-03	54287
E2	1,679E-02	62832
E3	2,083E-02	90478
E4	2,791E-02	125664

Através da análise da Tabela 4.5, verifica-se que o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade. O menor volume corresponde ao ensaio E1 com a severidade mínima enquanto que o maior volume corresponde ao ensaio E4 com a severidade máxima.

4.1.2.2. Coeficiente de Desgaste do Disco

Com base nos valores da Tabela 4.5 foi construído o gráfico de dispersão apresentado na Figura 4.1.

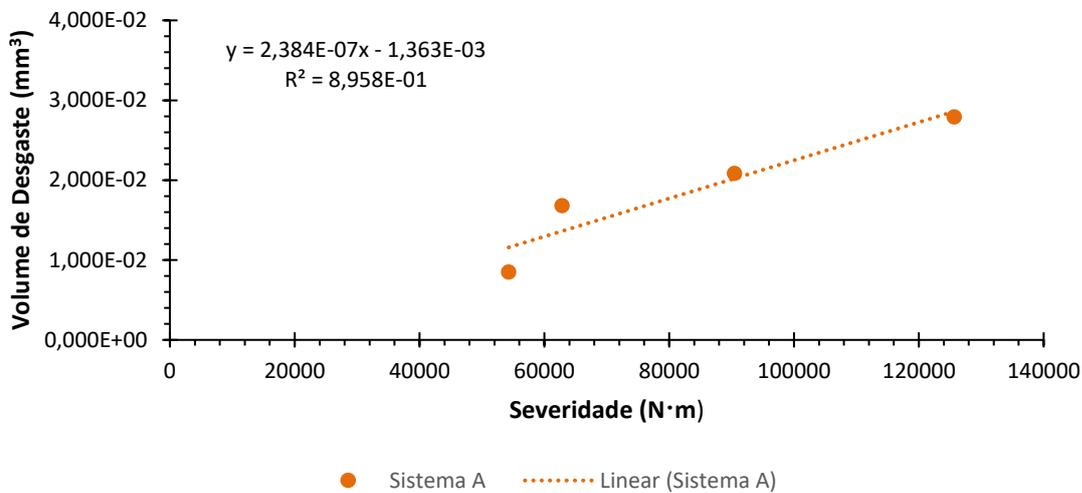


Figura 4.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema A.

De modo a determinar o coeficiente de desgaste do disco do sistema A foi aplicada uma regressão linear aos pontos do gráfico. O declive da reta de regressão linear corresponde ao coeficiente de desgaste pretendido. Assim, o disco do sistema A apresenta um coeficiente de desgaste de $2,384E-07 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. O coeficiente R^2 corresponde a uma medida estatística que indica a proximidade entre os pontos do gráfico e a reta de regressão linear. Neste caso, pode-se observar na Figura 4.1 que o R^2 assume o valor de 0,89, o que indica uma forte proporcionalidade linear direta entre volume de desgaste e a severidade, como previsto pela equação (3.7) sugerida por Czichos.

4.1.2.3. Volume de Desgaste do Contra Corpo

Foram também determinados os volumes de desgaste dos contra corpos (V_{cc}) correspondentes aos quatro ensaios do sistema A, encontrando-se expressos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema A.

Ensaio	$V_{cc} \text{ (mm}^3\text{)}$	Severidade (N·m)
E1	6,459E-03	54287
E2	8,559E-03	62832
E3	6,913E-03	90478
E4	8,259E-03	125664

Verifica-se que o menor volume corresponde ao ensaio E1 para a menor severidade. No ensaio E2, coincidente com um aumento de severidade, verifica-se o volume de desgaste do disco máximo do sistema. Já no ensaio E3, onde a severidade foi superior ao E2, ocorreu menor desgaste, comparativamente ao mesmo ensaio. No ensaio E4, para a severidade máxima, verifica-se um aumento do volume de desgaste em relação a E3, mas menor em relação a E2.

4.1.2.4. Coeficiente de Desgaste do Contra Corpo

De modo a poder ser determinado o coeficiente de desgaste do contra corpo foram representando os dados da Tabela 4.6 num gráfico de dispersão de volume de desgaste do contra corpo em função da severidade. O gráfico mencionado encontra-se ilustrado na Figura 4.2.

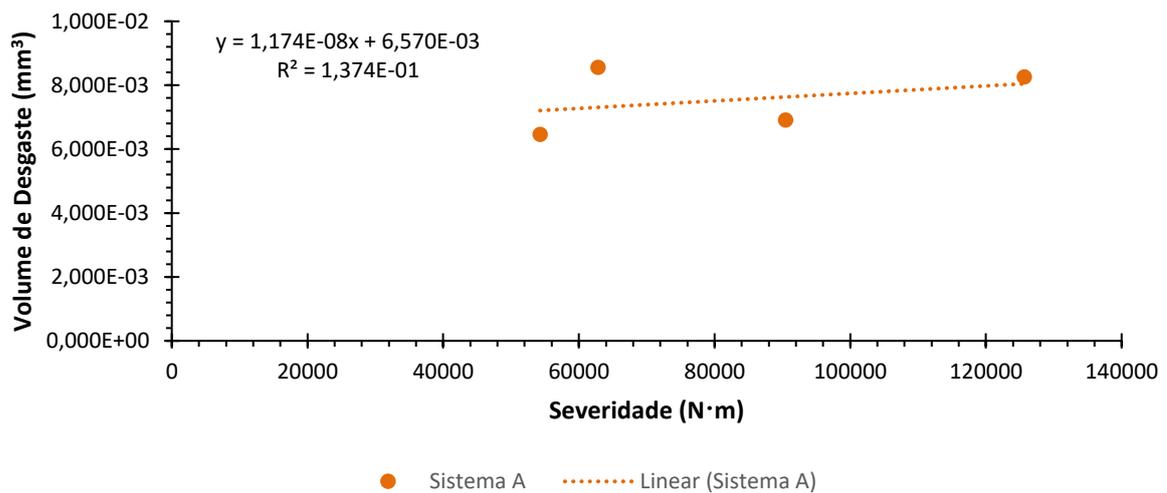


Figura 4.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema A.

A mesma metodologia, utilizada na determinação do coeficiente de desgaste do disco, foi seguida para o contra corpo. Neste caso, o contra corpo do sistema A apresenta um coeficiente de desgaste de $1,174E-08 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. De notar que neste Sistema A, o valor de 0,13 do R^2 indica uma débil relação de proporcionalidade linear entre o volume de desgaste do contra corpo e a severidade.

4.1.2.5. Curvas de Atrito

As curvas de atrito apresentam grande importância pois permitem caracterizar a evolução do atrito com o tempo de deslizamento. Para a construção das mesmas foram utilizados os dados recolhidos no tribómetro pino e disco. Na Figura 4.3 podem ser observadas as curvas de atrito correspondentes aos ensaios do sistema A.

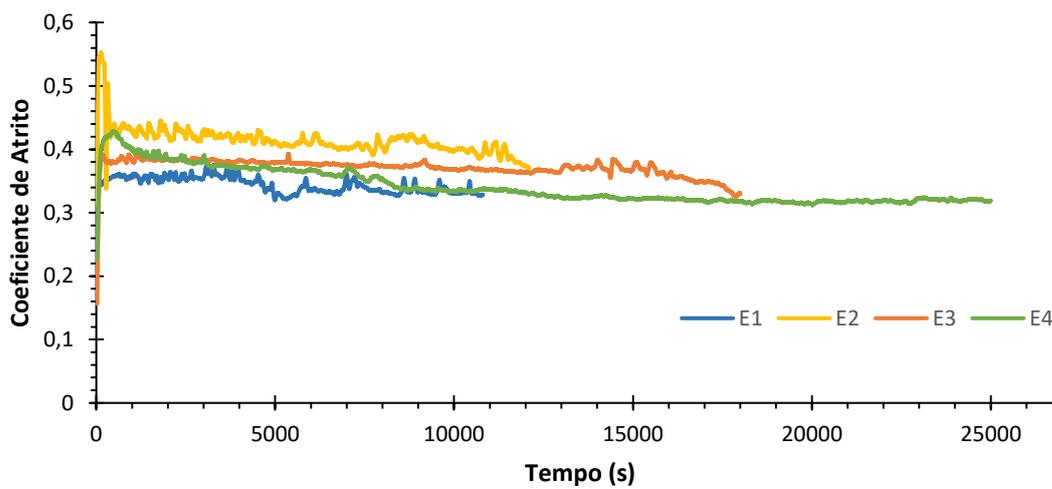


Figura 4.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema A.

Analisando as curvas de atritos evidenciadas na Figura 4.3 é possível observar uma diminuição do coeficiente de atrito ao longo do tempo para todas as curvas, sendo mais evidente para o caso da E4. Verifica-se também que a curva do ensaio E2 é superior às restantes em toda a sua extensão.

4.1.2.6. Coeficiente de Atrito Médio

Na Figura 4.4 são indicados os coeficientes de atrito médio dos ensaios do sistema A, determinados com recurso à média aritmética do conjunto de coeficientes de atrito instantâneos de cada teste tribológico.

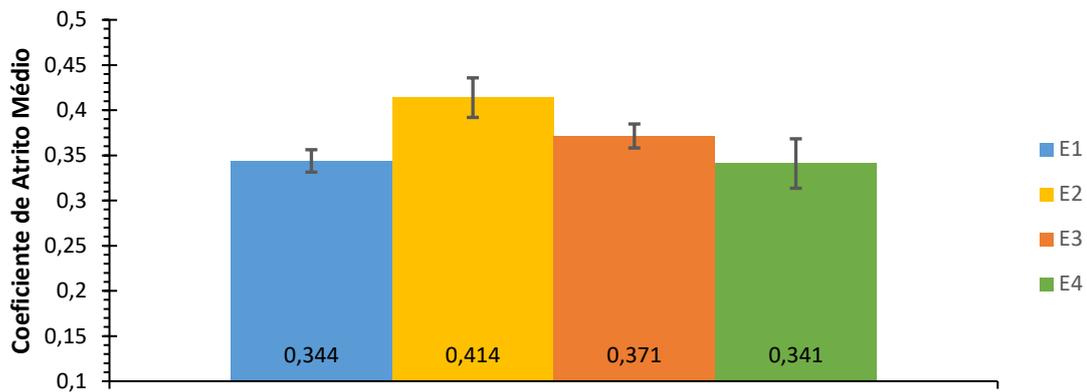


Figura 4.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema A.

Analisando a Figura 4.4 verifica-se que os coeficientes de atrito médio dos ensaios E1 e E4 são muito próximos, correspondendo respetivamente aos ensaios com menor e maior distância de deslizamento do sistema A. Nos ensaios E2 e E3, com distâncias de deslizamento compreendidas entre os ensaios E1 e E4, verificou-se um aumento dos coeficientes de atrito médio. Assim, estes resultados não são indicativos da influência da distância de deslizamento no coeficiente de atrito médio. O menor coeficiente de atrito médio ocorre para o ensaio E4 com o valor de 0,341. Em contrapartida, no ensaio E2 verifica-se o maior coeficiente de atrito médio correspondente a 0,414.

4.1.2.7. Variação do Coeficiente de Atrito Médio

A variação do coeficiente de atrito médio é um parâmetro de grande importância que deve ser determinado de modo a complementar e enquadrar o coeficiente de atrito médio de cada ensaio. Assim sendo, são apresentados na Tabela 4.7 e ilustrados na Figura 4.4 os coeficientes de atrito médio bem como as respetivas variações.

Tabela 4.7. Variação do Coeficiente de atrito do sistema A.

Ensaio	μ_{med}	$\Delta\mu$
E1	0,344	0,012
E2	0,414	0,021
E3	0,371	0,013
E4	0,341	0,027

A menor variação do coeficiente de atrito acontece no ensaio E1 com o valor de 0,012 e, por oposição, a maior variação para o ensaio E4 correspondendo a 0,027.

4.1.3. Comparação dos Sistemas A, B, C e D

Nesta secção foram analisados todos os sistemas em estudo de modo a poder ser realizada uma comparação global dos resultados.

4.1.3.1. Coeficiente de Desgaste dos Discos

O coeficiente de desgaste permite caraterizar a evolução do desgaste. Na Figura 4.5 são apresentadas as linhas de tendência dos quatro sistemas a partir das quais são determinados os respetivos coeficientes de desgaste.

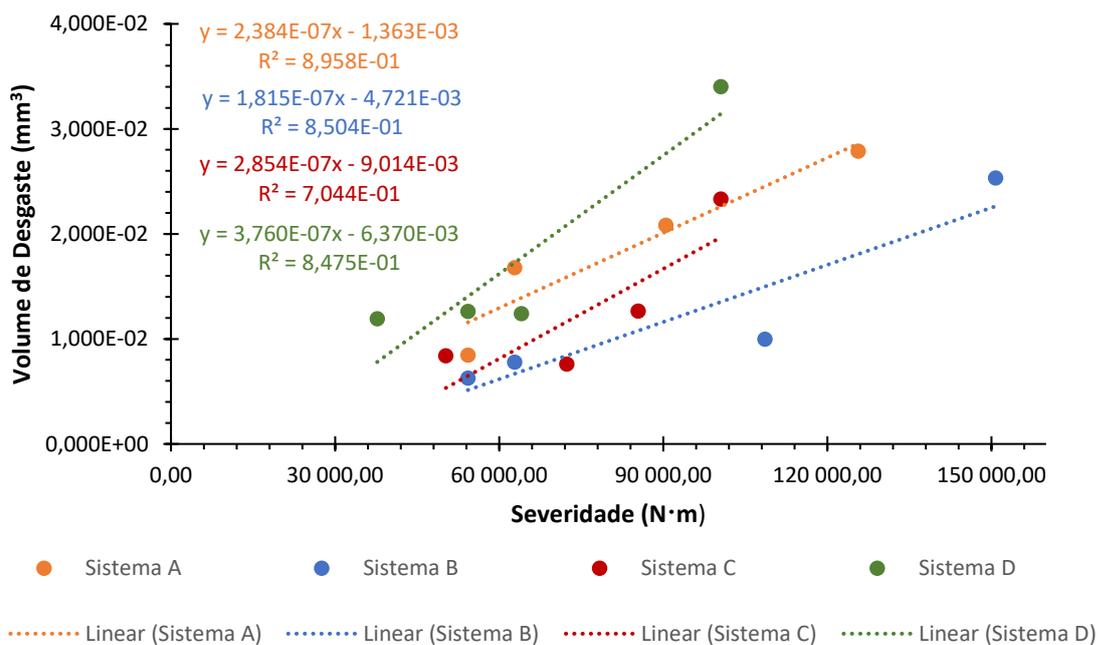


Figura 4.5. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A, B, C e D.

De forma a facilitar a comparação, são apresentados no gráfico de barras da Figura 4.6 os coeficientes de desgaste obtidos para os discos dos vários sistemas em estudo.

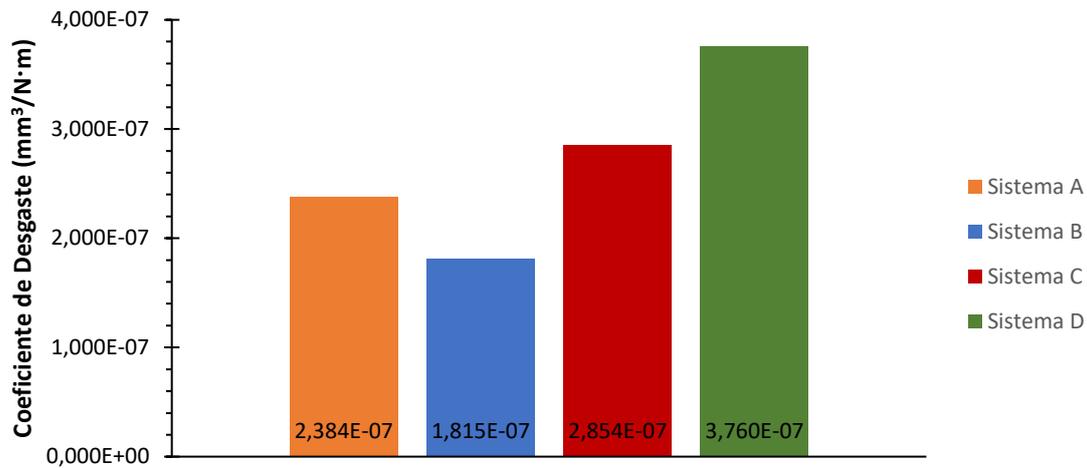


Figura 4.6. Gráfico de barras dos coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A, B, C e D.

Numa primeira análise aos coeficientes de desgaste dos discos verifica-se que apresentam a mesma ordem de grandeza. O menor coeficiente de desgaste pertence ao sistema B com o valor de $1,815\text{E}-7$. Seguem-se os coeficientes de desgaste dos sistemas A e C, sendo estes 31 e 57 % superiores, respetivamente. O maior coeficiente de desgaste corresponde ao sistema D fixando-se em $3,760\text{E}-7$. Este valor reflete um aumento de 107 % quando comparado ao do sistema B.

4.1.3.2. Coeficiente de Desgaste dos Contra Corpos

São apresentadas na Figura 4.7 as linhas de tendência dos contra corpos a partir das quais são determinados os respetivos coeficientes de desgaste.

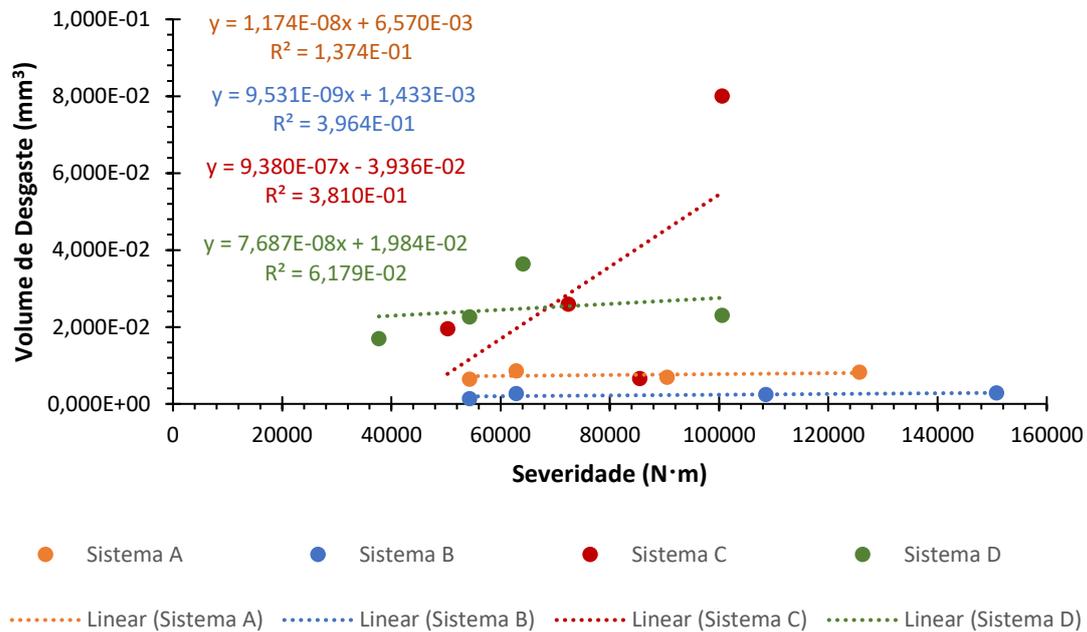


Figura 4.7. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A, B, C e D.

A partir da Figura 4.7 é possível notar que os coeficientes referentes aos quatro sistemas correspondem a três ordens de grandeza diferentes. Dado o grande desfasamento de valores obtidos, são apresentados na Tabela 4.8 os coeficientes de desgaste dos contra corpos (K_{cc}) e os respectivos aumentos percentuais relativamente ao menor coeficiente encontrado, correspondente ao sistema B.

Tabela 4.8. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A, B, C e D e correspondentes aumentos percentuais em relação ao coeficiente do sistema B.

Sistema	K_{cc} ($mm^3/N \cdot m$)	Aumento %
Sistema A	1,174E-08	23
Sistema B	9,531E-09	-
Sistema C	9,380E-07	9742
Sistema D	7,687E-08	707

O menor coeficiente de desgaste do contra corpo é evidenciado no sistema B. Os coeficientes dos sistemas A e D, comparativamente ao anterior, são 23 e 707 % respetivamente, superiores. Já o sistema C apresenta, por uma enorme margem, o maior coeficiente, sendo este 9742 % superior quando comparado ao do sistema B.

4.1.3.3. Coeficiente de Atrito Médio

Na Figura 4.8 são exibidos os coeficientes de atrito médio correspondentes aos sistemas A, B, C e D.

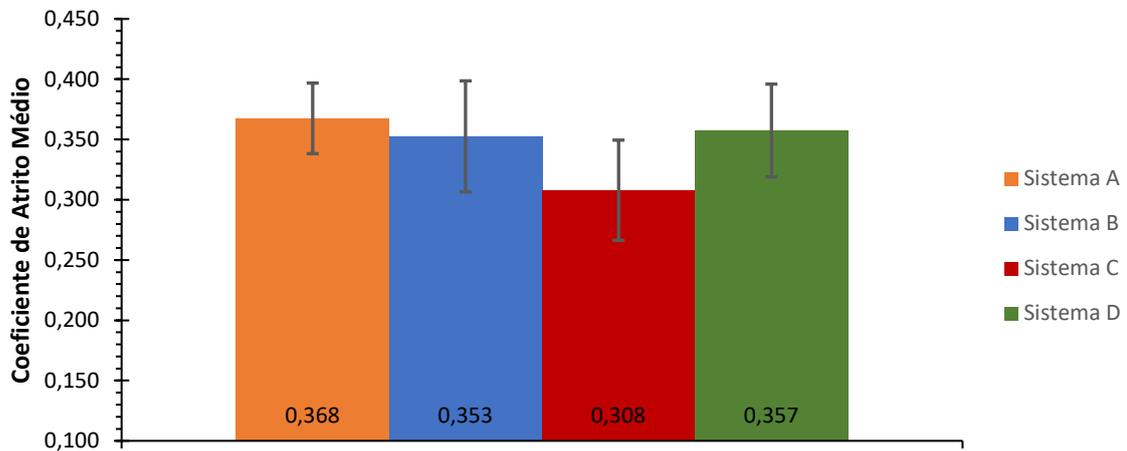


Figura 4.8. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas A, B, C e D.

Ao analisar a Figura 4.8 pode-se observar que o menor coeficiente de atrito médio diz respeito ao sistema C com o valor de 0,308. Os coeficientes correspondentes aos sistemas B e D apresentam-se respetivamente 15 e 16 % superiores. O sistema A evidencia o maior coeficiente de atrito médio com o valor de 0,368, sendo 19 % superior ao menor.

4.1.3.4. Variação do Coeficiente de Atrito Médio

São apresentados na Tabela 4.9 e ilustrados na Figura 4.8 os coeficientes de atrito médio de cada sistema bem como as respetivas variações.

Tabela 4.9. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas A, B, C e D.

Sistema	μ_{med}	$\Delta\mu$
A	0,368	0,029
B	0,353	0,046
C	0,308	0,042
D	0,357	0,038

No sistema A ocorre a menor variação do coeficiente de atrito fixando-se no valor de 0,029. No sistema B verifica-se a maior variação do coeficiente de atrito com o valor de 0,046.

4.2. Discussão

A primeira fase de discussão encontra-se centrada na caracterização mecânica dos compósitos de WC-Co e WC-SS. Através do teste de Vickers determinou-se a dureza HV30 (kgf/mm^2) de 1491 ± 36 para o compósito de WC-Co e de 1542 ± 18 para o WC-AISI 304. Posteriormente, com recurso ao teste de Palmqvist, foi determinada a tenacidade à fratura, K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), de $9,7 \pm 1,1$ para o WC-Co e de $7,8 \pm 0,3$ para o WC-AISI 304.

L.M. Vilhena *et al.* [6] caracterizou a resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de WC-Co e WC-AISI 304, onde procedeu à medição das propriedades mecânicas dos mesmos. No que diz respeito aos valores calculados neste trabalho para as propriedades mecânicas do WC-Co, quando comparados com resultados obtidos por L.M. Vilhena *et al.* [6] para o mesmo material, verifica-se que se obteve uma dureza cerca de 15 % superior e uma tenacidade à fratura 34 % inferior. Em relação ao compósito de WC-AISI 304, também em comparação com os resultados adquiridos por L.M. Vilhena *et al.* [6], verificam-se uma grande proximidade, tendo-se obtido para este trabalho valores para a dureza e tenacidade à fratura 6 e 2 % inferiores, respetivamente.

Os valores relativos às propriedades mecânicas encontram-se em concordância com os propostos por L.M. Vilhena *et al.* [6], tendo a maior diferença correspondido à tenacidade à fratura do WC-Co. As diferenças verificadas podem ter como base variações da composição, de microestrutura ou de tamanho de grão entre os vários compósitos.

Quando comparados os valores das propriedades dos dois compósitos em estudo é verificada a tendência de que o aumento de dureza se traduz na diminuição da tenacidade à fratura.

A segunda fase de discussão tem como foco a caracterização tribológica dos compósitos sujeitos a desgaste por deslizamento não lubrificado. Os ensaios tribológicos foram realizados segundo uma velocidade de deslizamento e carga normal aplicada constantes de modo a minimizar o número de variáveis e centrar o estudo nos compósitos de WC-Co e de WC-SS bem como na influência do material do contra corpo.

Os resultados dos vários ensaios tribológicos indicam que o volume de desgaste dos discos das amostras tende a aumentar de forma linear com o aumento da severidade, estando de acordo com a previsão de Czichos expressa na equação (3.7). Este comportamento não foi tão evidenciado para o caso dos contra corpos.

Ao par tribológico WC-Co – alumina do sistema B corresponde o menor coeficiente de desgaste do disco e também do contra corpo. O segundo menor coeficiente de desgaste, tanto para o disco como para o contra corpo, diz respeito ao sistema A composto pelo WC-Co e AISI L3. No entanto, analisando os sistemas C e D, que fazem uso do compósito WC-SS, outro cenário é verificado. O uso do contra corpo de alumina no sistema D traduz-se num coeficiente de desgaste do disco mais elevado comparativamente ao sistema C onde é utilizado o AISI L3. Nos sistemas C e D pode também ser observado que ao menor coeficiente de desgaste do disco corresponde o maior coeficiente de desgaste do contra corpo e vice-versa.

Com base nos resultados obtidos pode ser concluído que o coeficiente de desgaste depende e varia segundo o par tribológico utilizado.

Globalmente o compósito WC-Co demonstrou melhor desempenho no que ao desgaste diz respeito, enquanto que o compósito WC-SS que se apresenta como alternativa aos compósitos tradicionais à base de WC, no seu melhor cenário evidenciou um coeficiente de desgaste 57 % superior comparativamente à melhor performance do WC-Co.

O atrito pode ser descrito como uma força que se opõe ao movimento relativo entre corpos. Acredita-se que este fenómeno seja o resultado de três processos: de adesão, de lavragem e de deformação plástica de irregularidades da superfície.

Apesar dos vários materiais em estudo apresentarem bom acabamento superficial e com isso baixa rugosidade, o processo de desgaste provoca um aumento da rugosidade das superfícies e com isso o desenvolvimento do atrito.

Para todas as curvas de atrito foi visível um rápido aumento do coeficiente de atrito nos primeiros metros de deslizamento. Este fenómeno corresponde ao regime de rodagem, no qual processos de desgaste por polimento diminuem a rugosidade e eliminam as irregularidades da superfície através de deformação plástica. No entanto, após o regime de rodagem, dois comportamentos distintos foram constatados. Algumas curvas tenderam a estabilizar e diminuir ligeiramente o coeficiente de atrito com o tempo, enquanto outras manifestaram múltiplos picos ou um comportamento ondulatório ao longo do tempo.

Ao relacionar o comportamento das curvas de atrito com o tipo de compósito utilizado é verificada uma tendência. As curvas correspondentes aos ensaios tribológicos em que foi empregue o WC-Co apresentam um comportamento mais estável comparativamente às curvas de atrito pertencentes ao WC-SS.

A razão por detrás da maior estabilidade exibida pelas curvas de atrito do WC - Co pode estar relacionada com a formação de tribofilmes. À medida que o deslizamento entre o disco e o contra corpo ocorre são produzidos detritos com origem na extrusão da fase ligante bem como na fratura e fragmentação de grãos de WC, gerando desgaste. Uma parte dos detritos fica retida na pista de desgaste enquanto que a restante parte é acumulada na periferia da pista. Os detritos de WC e de ligante presentes na pista podem aglomerar levando à formação de um tribofilme. A camada formada, por ter características diferentes do compósito, pode apresentar um efeito protetor e influenciar tanto o atrito como a resistência ao conseqüente desgaste.

A formação de tribofilmes no compósito de WC-Co durante os ensaios tribológicos fundamenta a maior estabilidade das curvas de atrito assim como o menor coeficiente de desgaste para este verificado. O mesmo não deverá ter ocorrido para o compósito de WC-SS, dando origem a curvas de atrito instáveis e a coeficientes de desgaste superiores.

As curvas de atrito correspondentes aos ensaios E7 e E8 são caracterizadas pela presença de zonas estáveis seguidas de picos onde o coeficiente de atrito aumenta abruptamente, voltando este a descer e a manter-se estável. Este fenómeno pode estar relacionado com a formação e destruição de tribocamadas, em que as zonas estáveis são associadas à formação de tribofilmes enquanto que os picos, onde o coeficiente de atrito se eleva, podem indicar o arrancamento do tribofilme anteriormente formado.

No que ao coeficiente médio diz respeito, não foi observada nenhuma relação clara e evidente quer entre este e as curvas de atrito quer com os coeficientes de desgaste.

A análise SEM realizada ao disco não limpo após a realização do ensaio tribológico, pertencente ao sistema D, permitiu observar a pista de desgaste do mesmo, bem como a deposição de detritos provenientes do desgaste por deslizamento. Na Figura 4.9 pode ser observada a pista de desgaste segundo duas magnificações. Verifica-se uma deposição de material desgastado uniforme ao longo da periferia da pista de desgaste. Este material desgastado não compactado caracteriza-se pela fina granulometria que apresenta. Os detritos acumulados na periferia da pista não são determinantes no desgaste uma vez que se encontram fora da superfície onde ocorre o deslizamento.

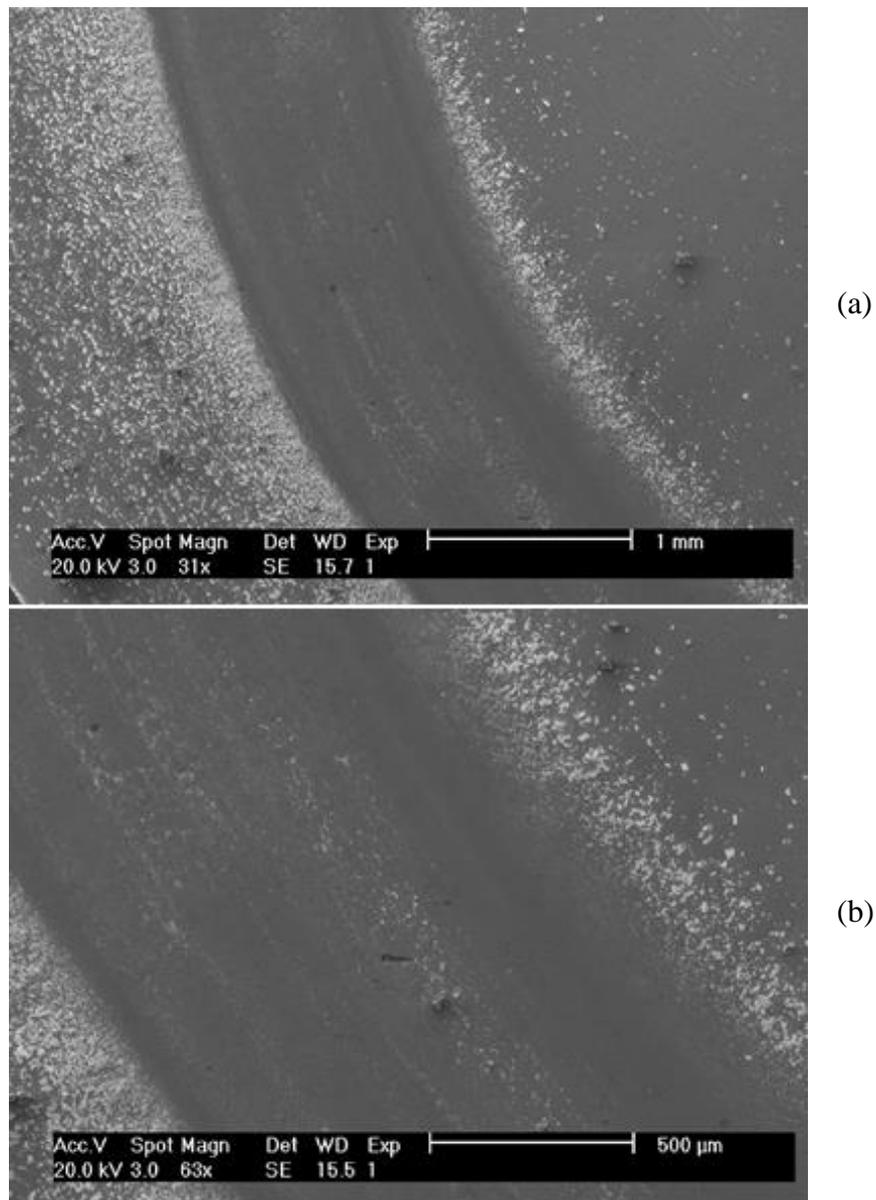


Figura 4.9. Fotografia SEM da pista de desgaste e detritos resultantes do desgaste de um ensaio do sistema D. Segundo uma magnificação de 31x (a), segundo uma magnificação de 63x (b).

Na Figura 4.10 são apresentados em detalhe detritos resultantes da interação entre as suas superfícies em deslizamento, correspondendo a duas localizações diferentes da periferia da mesma pista de desgaste. É possível notar que o material desgastado assume um formato irregular e anguloso com diferentes dimensões.

A partir da análise SEM foi ainda possível observar na pista de desgaste, ainda que não muito pronunciado, o plano preferencial de deslizamento. Este plano é ilustrado na Figura 4.11.

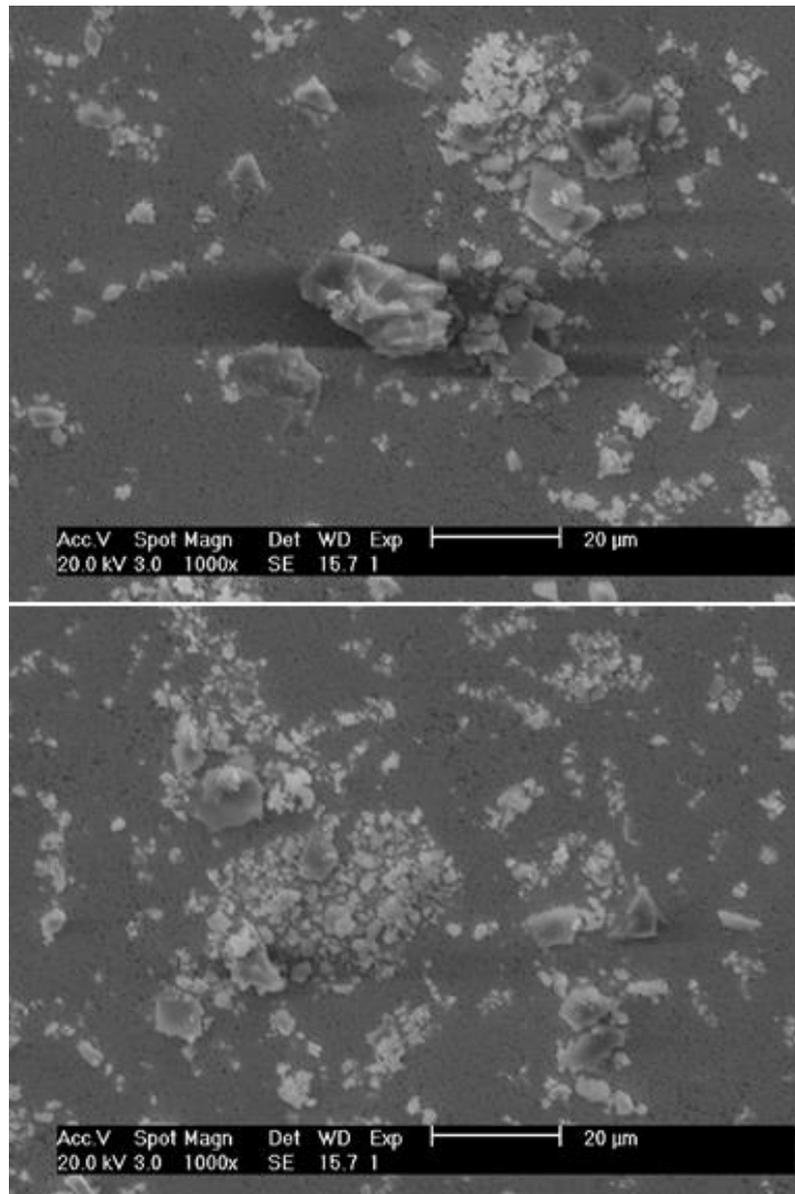


Figura 4.10. Fotografias SEM de detritos resultantes do desgaste de um ensaio do sistema D, correspondendo a duas localizações diferentes da periferia da mesma pista de desgaste.

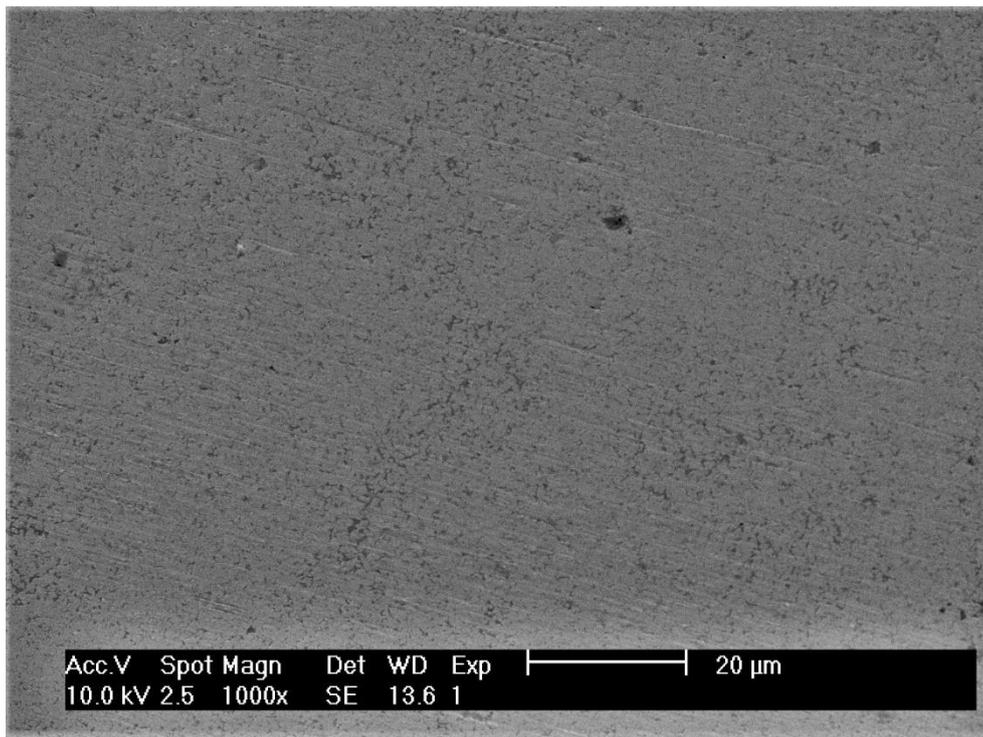


Figura 4.11. Fotografia SEM do plano preferencial de deslizamento de um ensaio do sistema D.

A observação SEM dos discos que foram limpos após o teste tribológico demonstrou-se inconclusiva, não tendo sido possível tirar ilações dessa mesma observação.

Desta forma, embora este tipo de análise tenha contribuído para a caracterização dos detritos resultantes do desgaste na periferia da pista e na identificação do plano preferencial de desgaste, não permitiu demonstrar a existência de tribofilmes na superfície das pistas de desgaste.

Também não foi possível aferir, através desta análise, sobre os mecanismos de desgaste dos compósitos em estudo.

Adicionalmente, a observação do contra corpo limpo após o ensaio tribológico, através do microscópio ótico ou do microscópio ótico com máquina fotográfica, foi realizada no sentido de proceder à medição da calota esférica, não tendo fornecido informação acerca da existência de material depositado, resultante do contacto tribológico, na superfície do contra corpo.

A terceira e última fase de discussão tem como propósito a relação entre as propriedades mecânicas e as propriedades tribológicas dos compósitos à base de WC em estudo.

O desgaste provocado pelo deslizamento relativo entre materiais pode ter como origem mecanismos de adesão, de fadiga superficial, triboquímicos e de abrasão.

O desgaste por adesão ocorre quando as asperezas das superfícies em contacto formam uma ligação adesiva entre si, levando à deformação plástica, adesão e posterior fratura de uma porção do material. Este fenómeno encontra-se relacionado com as propriedades dureza e tenacidade à fratura.

De outra forma, o desgaste por fadiga superficial tem como base processos de fadiga associados a carregamentos cíclicos. Este tipo de desgaste caracteriza-se pela sequência: deformação elástica, deformação plástica, iniciação e propagação de fissuras e fratura. Assim, é esperado que a tenacidade à fratura e o módulo de elasticidade evidenciem um papel importante neste tipo de desgaste.

O desgaste abrasivo ocorre devido à penetração de partículas duras, ou asperezas de um corpo duro em superfícies mais macias em movimento relativo e sobre a ação de carga aplicada. Sendo a dureza considerada uma medida de resistência à penetração, esta propriedade afigura-se significativa neste fenómeno.

Além disso, durante o deslizamento entre superfícies são evidenciadas deformações elásticas e plásticas resultantes do contacto tribológico, estando estas associadas ao módulo de elasticidade e tenacidade à fratura.

Desta forma são aferidas como principais propriedades mecânicas dos compósitos à base de WC a tenacidade à fratura, a dureza e o módulo de elasticidade.

Uma vez que neste trabalho não foram aferidos valores para o módulo de elasticidade dos compósitos, recorreu-se à literatura.

C.M. Fernandes *et al.* [4] realizou uma caracterização mecânica ao compósito WC-10AISI 304 estimando o módulo de elasticidade no valor de 513 ± 7 GPa. S. Okamoto *et al.* [55] investigou as propriedades mecânicas de compósitos de WC-Co com diferentes tamanhos de grão assim como teores em fase ligante. Com base nos resultados apresentados por este autor, pode ser estimado o valor de 550 GPa para o compósito de WC-Co com 10% em peso em fase ligante de cobalto.

No que às propriedades tribológicas diz respeito, definiram-se como propriedades representativas de cada sistema em estudo o coeficiente de atrito médio e o coeficiente de desgaste do disco.

A primeira correlação corresponde ao coeficiente de atrito médio e à propriedade mecânica dureza. A dureza pode ser definida como uma medida de resistência à penetração ou à deformação plástica do material. Sabendo que ambos os compósitos exibem um elevado valor de dureza e que esta se relaciona com os mecanismos de desgaste presentes em desgaste por deslizamento, então esta propriedade poderá apresentar influência no coeficiente de atrito bem como no coeficiente de desgaste.

Representando graficamente os coeficientes de atrito médio de cada sistema em função da dureza correspondente ao compósito utilizado nesse mesmo sistema obteve-se o gráfico ilustrado na Figura 4.12. Foi aplicada uma regressão linear de forma a estabelecer a tendência entre as duas variáveis.

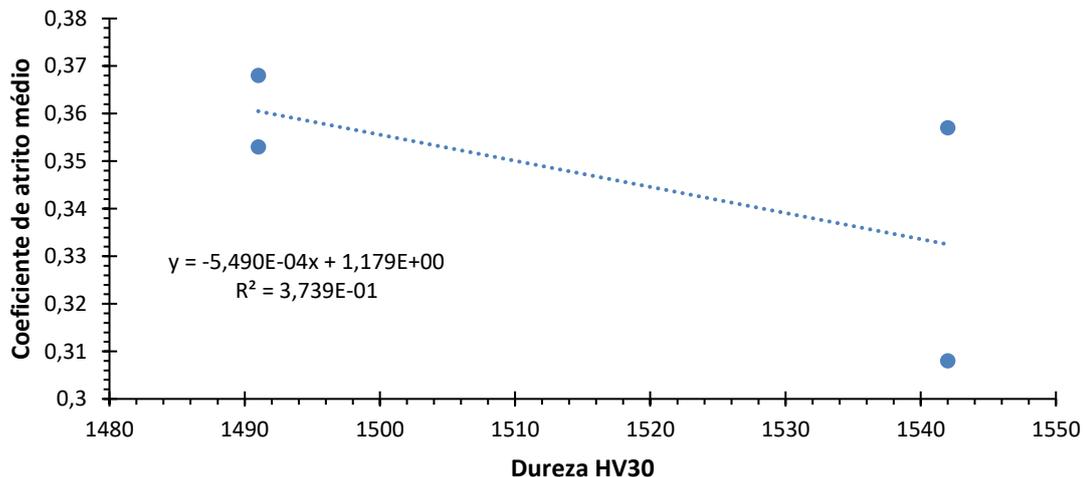


Figura 4.12. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e dureza HV30.

Ao analisar a Figura 4.12 pode-se observar uma tendência linear com declive negativo entre o coeficiente de atrito médio e a dureza. Isto significa que o coeficiente de atrito médio tende a diminuir com o aumento da dureza. No entanto o valor do coeficiente de determinação R^2 de 0,37 indica que a relação estabelecida entre propriedades é baixa.

A tenacidade à fratura corresponde a uma medida de resistência à propagação de fissuras que o material suporta. Os compósitos de WC-Co e WC-SS apresentam um comportamento semelhante a um material cerâmico pelo que exibem baixos valores de tenacidade à fratura. Além disso, esta propriedade assume um papel importante nos mecanismos de desgaste por adesão bem como em desgaste por fadiga superficial.

Representando graficamente, neste caso os coeficientes de atrito médio de cada sistema em função da tenacidade à fratura correspondente ao compósito utilizado nesse mesmo sistema, obteve-se o gráfico representado na Figura 4.13. Foi novamente aplicada uma regressão linear de forma a estabelecer a tendência entre as duas variáveis.

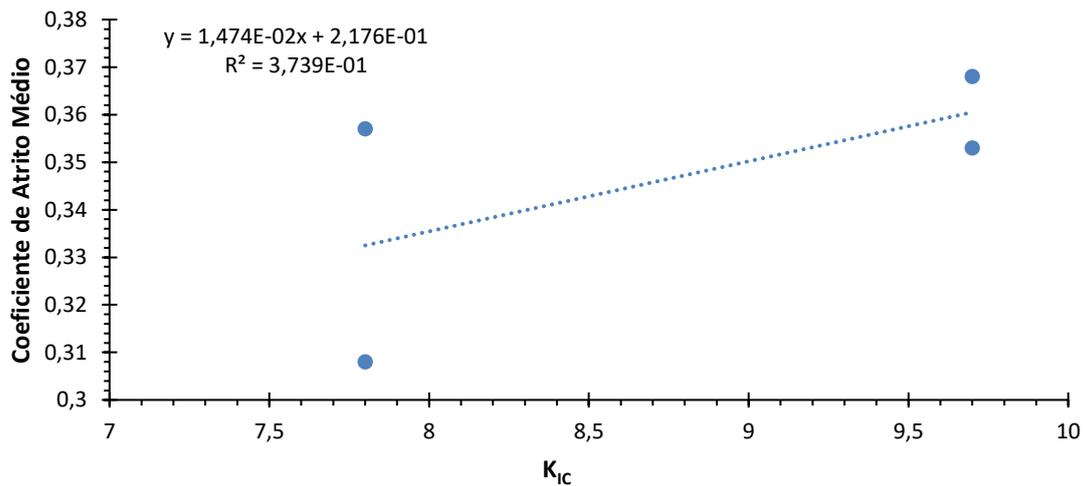


Figura 4.13. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e tenacidade à fratura K_{1c} .

O gráfico mostrado na Figura 4.13 evidencia uma tendência linear com declive positivo entre o coeficiente de atrito médio e a tenacidade à fratura. Isto implica que o aumento da tenacidade à fratura se traduz no aumento do coeficiente de atrito médio. Todavia, o valor do coeficiente de determinação R^2 de 0,37 indica uma baixa relação de proporcionalidade linear entre as variáveis.

O módulo de elasticidade é uma grandeza correspondente à rigidez de um material quando solicitado a tensões externas de tração ou compressão. Diz respeito à razão entre a tensão aplicada e a deformação elástica sofrida pelo material.

Seguindo a mesma metodologia, foram representados graficamente os coeficientes de atrito médio de cada sistema em função do módulo de elasticidade correspondente ao compósito utilizado nesse mesmo sistema. O gráfico apresentado na Figura 4.14 mostra a relação entre as variáveis descritas bem como a reta de regressão linear aplicada de forma a estabelecer a tendência entre as duas variáveis.

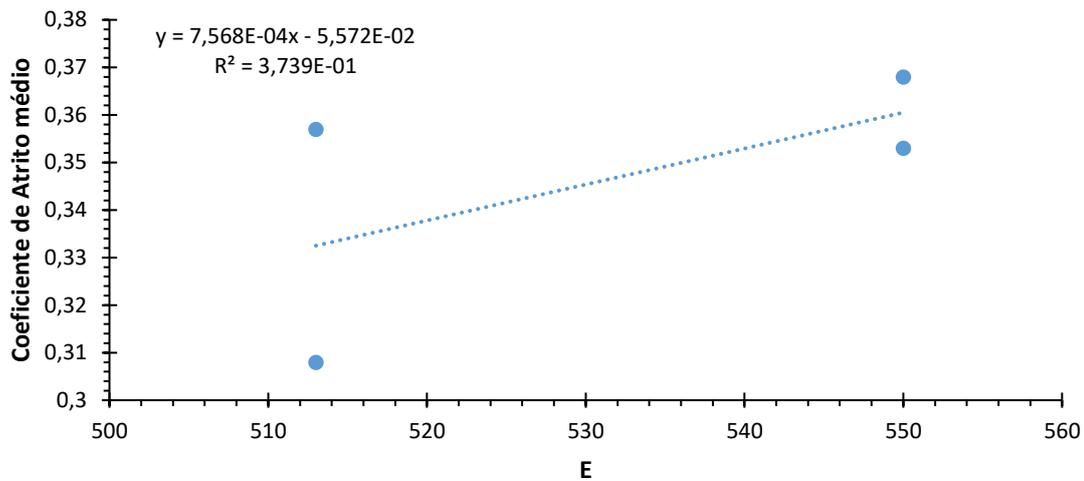


Figura 4.14. Correlação entre o coeficiente de atrito médio e o módulo de elasticidade E.

A partir do gráfico apresentado na Figura 4.14 pode ser observada uma tendência linear com declive positivo entre o coeficiente de atrito médio e o módulo de elasticidade, o que quer dizer que o aumento do módulo de elasticidade implica o aumento do coeficiente de atrito médio. Também nesta correlação foi obtido um coeficiente de determinação R^2 de 0,37 indicando uma baixa relação de proporcionalidade linear entre as variáveis.

De modo a estabelecer uma possível relação entre os coeficientes de desgaste dos disco e as propriedades mecânicas de maior relevância anteriormente estabelecidas foi realizada o mesmo tipo de análise efetuada para o coeficiente de atrito médio.

Assim, seguindo o mesmo critério foram representados graficamente os coeficientes de desgaste do disco de cada sistema em função da propriedade dureza correspondente ao compósito utilizado nesse mesmo sistema. Na Figura 4.15 pode ser observado o gráfico contendo a relação entre as variáveis mencionadas bem como a reta de regressão linear aplicada de forma a estabelecer a tendência entre as duas variáveis.

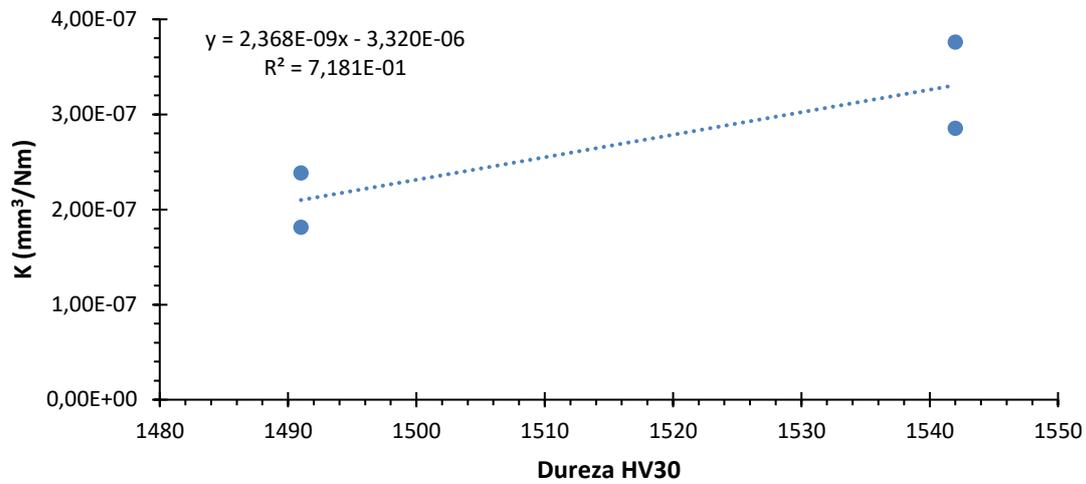


Figura 4.15. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e a dureza HV30.

Foi observada uma tendência linear com declive positivo entre o coeficiente de desgaste e a dureza. O aumento da dureza do compósito traduz-se no aumento do coeficiente de desgaste. Para esta correlação foi obtido um coeficiente de determinação R^2 de 0,71 implicando uma relação de proporcionalidade linear razoável entre as variáveis em estudo.

A correlação seguinte faz referência ao coeficiente de desgaste dos discos e a tenacidade à fratura. Assim, foi também realizada a representação gráfica das variáveis referidas e aplicada uma regressão linear dando origem ao gráfico ilustrado na Figura 4.16.

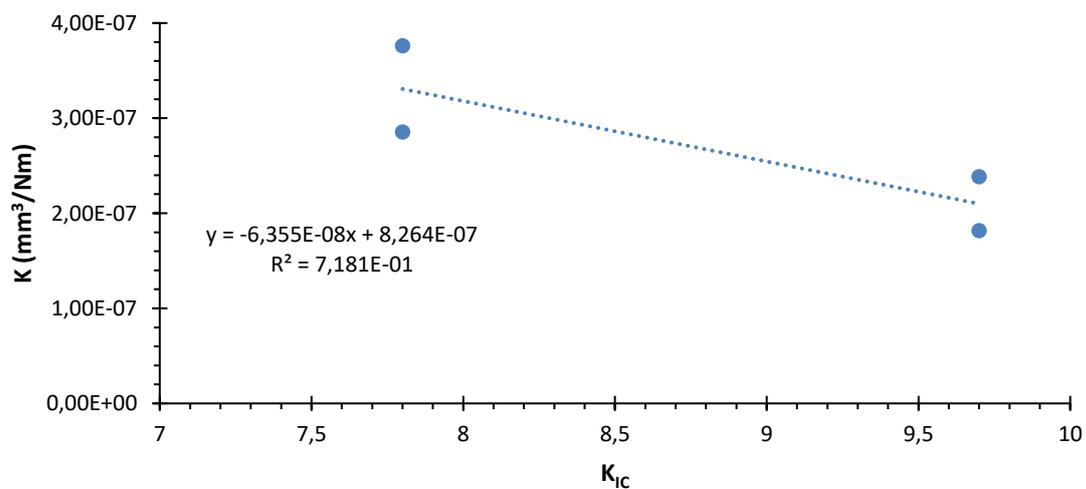


Figura 4.16. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e tenacidade à fratura K_{IC} .

Para esta correlação foi averiguada uma tendência linear com declive negativo, significando que o coeficiente de desgaste dos discos é inversamente proporcional à tenacidade à fratura dos mesmos. Obteve-se uma relação de proporcionalidade linear razoável entre as variáveis justificada pelo coeficiente de determinação R^2 de 0,71.

De modo idêntico, agora para a correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e o correspondente módulo de elasticidade, construiu-se o gráfico ilustrado na Figura 4.17.

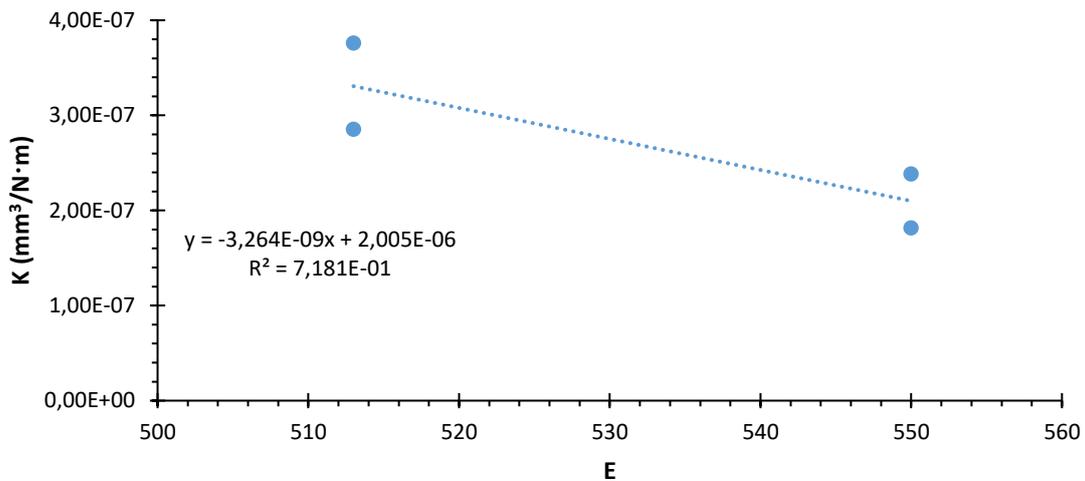


Figura 4.17. Correlação entre o coeficiente de desgaste do disco e módulo de elasticidade E.

A partir da Figura 4.17 foi apurada uma tendência linear com declive negativo, o que implica que o coeficiente de desgaste dos discos é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade dos mesmos. Neste caso foi também determinado um coeficiente R^2 de valor 0,71 para a correlação, correspondendo a uma relação razoável de proporcionalidade linear.

Por último, de forma a avaliar a dependência entre as propriedades tribológicas e as propriedades mecânicas dos compósitos de WC-Co e WC-SS, recorreu-se ao coeficiente de Evans. Este coeficiente, apresentado na equação (3.13), permite estabelecer a relação entre o coeficiente de desgaste dos discos e as propriedades: dureza, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade.

Assim, seguindo o mesmo método anteriormente aplicado, foi construído o gráfico retratado na Figura 4.18, onde se representa o coeficiente de desgaste dos discos em

função do coeficiente de Evans. A aplicação de uma regressão linear aos pontos do gráfico torna possível obter a tendência que caracteriza a relação das variáveis.

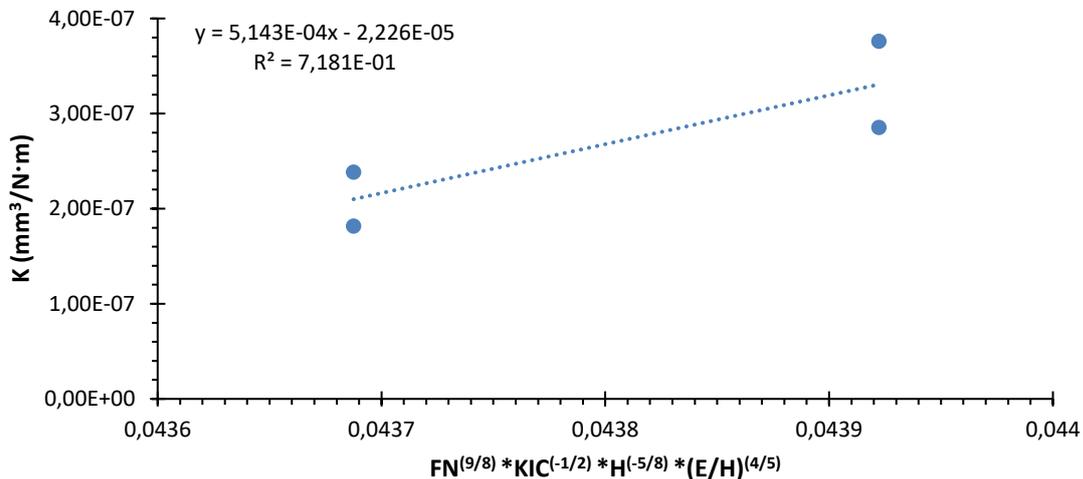


Figura 4.18. Correlação de Evans.

Ao analisar a Figura 4.18 pode-se observar uma tendência linear com declive positivo, significando que o coeficiente de desgaste tende a aumentar com o aumento do coeficiente de Evans. O coeficiente de determinação R^2 de 0,71 indica novamente que a relação estabelecida entre propriedades é razoável.

Na Tabela 4.10 é apresentado um resumo das correlações obtidas entre as propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos à base de WC.

Tabela 4.10. Correlações entre as propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos à base de WC.

	Dureza HV30	Tenacidade à Fratura	Módulo de Elasticidade	Correlação de Evans
Coeficiente de atrito médio	↓	↑	↑	-
Coeficiente de desgaste dos discos - K	↑	↓	↓	↑

Legenda: ↑ Diretamente proporcional
 ↓ Inversamente proporcional

Em suma, foram estabelecidas correlações e verificadas tendências entre o coeficiente de atrito médio dos vários sistemas e as várias propriedades mecânicas dos compósitos. No entanto, todas estas correlações evidenciaram um coeficiente de determinação de 0,37 o que indica uma relação relativamente fraca entre variáveis.

Da mesma maneira foi também possível obter correlações e observar tendências entre o coeficiente de desgaste dos discos e as propriedades mecânicas e também entre o coeficiente de desgaste dos discos e o coeficiente de Evans. Para as correlações descritas foi obtido um coeficiente de determinação superior, de valor 0,71, sendo este indicativo de uma relação razoável entre propriedades.

Assim, não é totalmente evidente que as propriedades mecânicas dureza, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade dos compósitos de WC-Co e WC-SS apresentem uma relação direta, clara e inequívoca com as propriedades tribológicas coeficiente de atrito médio e coeficiente de desgaste.

Estes resultados corroboram a hipótese anteriormente apresentada. O factor mais determinante nas propriedades tribológicas de um compósito à base de WC não corresponde às propriedades mecânicas conferidas ao compósito pela fase ligante, mas sim à capacidade da fase ligante na formação de tribofilmes de carácter protetor da superfície sujeita a desgaste.

5. CONCLUSÕES

Na presente dissertação foi realizada a caracterização mecânica assim como a caracterização tribológica dos compósitos de WC-Co e de WC-AISI 304. Após a apresentação dos resultados e da discussão onde foram relacionadas as propriedades mecânicas com as propriedades tribológicas obtidas, segue-se agora a exposição das principais conclusões retiradas.

Coefficiente de Atrito

- Para todos os ensaios observou-se um rápido aumento do coeficiente de atrito nos primeiros metros de deslizamento, correspondendo ao regime de rodagem;
- O coeficiente de atrito é independente do tempo e/ou distância de deslizamento, com exceção do regime de rodagem;
- As curvas de atrito dos ensaios correspondentes ao compósito de WC-Co tendem a apresentarem um comportamento mais estável comparativamente às curvas correspondentes ao compósito WC-AISI 304;
- Ao sistema D, composto pelo par tribológico WC-AISI 304 – AISI L3, corresponde o menor coeficiente de atrito médio do sistema e o maior coeficiente de desgaste do contra corpo;
- O maior coeficiente de atrito médio do sistema ocorre para o sistema A constituído pelo par tribológico WC-Co – AISI L3;
- O coeficiente de atrito médio não se correlaciona com o coeficiente de desgaste dos discos;
- O sistema A, constituído pelo par tribológico WC-Co - AISI L3 evidenciou um maior coeficiente de atrito médio comparativamente ao sistema B composto pelo par tribológico WC-Co – Al₂O₃;
- O sistema C, constituído pelo par tribológico WC-AISI 304 - AISI L3 evidenciou um menor coeficiente de atrito médio comparativamente ao sistema D composto pelo par tribológico WC-AISI 304 – Al₂O₃;

- O coeficiente de atrito médio é inversamente proporcional à dureza do compósito à base de WC;
- O coeficiente de atrito médio é diretamente proporcional à tenacidade à fratura e ao módulo de elasticidade do compósito à base de WC.

Coefficiente de desgaste

- O volume de desgaste tende a aumentar com o aumento da severidade como previsto pela expressão de Czichos baseada na equação de Archard;
- O menor coeficiente de desgaste do disco e também o menor coeficiente de desgaste do contra corpo ocorrem para o sistema B correspondendo ao par tribológico WC-Co – Al₂O₃;
- O maior coeficiente de desgaste do disco ocorre para o sistema D correspondendo ao par tribológico WC-AISI 304 – Al₂O₃;
- O sistema A, constituído pelo par tribológico WC-Co - AISI L3 evidenciou um maior coeficiente de desgaste tanto para o disco como para o contra corpo comparativamente ao sistema B composto pelo par tribológico WC-Co – Al₂O₃;
- O sistema C, constituído pelo par tribológico WC-AISI 304 - AISI L3 evidenciou um menor coeficiente de desgaste do disco comparativamente ao sistema D composto pelo par tribológico WC-AISI 304 – Al₂O₃;
- Aos sistemas em que foi usado o compósito de WC-Co correspondem os menores coeficientes de desgaste do disco e também do contra corpo;
- O coeficiente de desgaste do disco é diretamente proporcional à dureza e ao coeficiente de Evans do compósito à base de WC;
- O coeficiente de desgaste do disco é inversamente proporcional à tenacidade à fratura e ao módulo de elasticidade do compósito à base de WC.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Fazendo uma análise global ao trabalho desenvolvido, considera-se que a presente dissertação conseguiu atingir as principais metas estabelecidas. Foi realizada a caracterização mecânica e tribológica dos compósitos de WC-Co e de WC-AISI 304, bem como investigada a influência da fase ligante e a relação entre as propriedades mecânicas e as propriedades tribológicas. No entanto algumas questões carecem de explicação, assim sugere-se para trabalho futuro:

- Realizar o mesmo tipo de testes tribológicos, mas com o objetivo principal de investigar a influência das condições do meio envolvente, temperatura e humidade relativa no desgaste por deslizamento;
- Realizar o mesmo tipo de testes tribológicos, procedendo à examinação detalhada dos discos e contra corpos não limpos após os ensaios de modo a identificar e caracterizar possíveis tribofilmes formados;
- Compreender de que modo a formação de tribofilmes influencia o atrito e o desgaste em compósitos à base de WC.
- Compreender que tipo de fases ligantes apresentam maior propensão à formação de tribofilmes em compósitos de WC.
- Investigar a formação de tribofilmes em ensaios de deslizamento lubrificado;
- Investigar de forma mais aprofundada a relação entre as propriedades mecânicas e as propriedades tribológicas com recurso a um maior número de compósitos com diferente fase ligante;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. M. Ortner, P. Ettmayer, and H. Kolaska, “The history of the technological progress of hardmetals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 44, pp. 148–159, 2014.
- [2] C. M. Fernandes *et al.*, “WC-stainless steel hardmetals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 72, pp. 21–26, 2018.
- [3] N. Magnusson and Schmidt, “Understanding cemented carbides,” *Sandvik*, p. 20, 2008.
- [4] C. M. Fernandes *et al.*, “Mechanical characterization of WC-10wt% AISI 304 cemented carbides,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 618, pp. 629–636, 2014.
- [5] G. S. Upadhyaya, “Materials science of cemented carbides — an overview,” *Mater. Des.*, vol. 22, no. 6, pp. 483–489, 2001.
- [6] L. M. Vilhena, C. M. Fernandes, E. Soares, J. Sacramento, A. M. R. Senos, and A. Ramalho, “Abrasive wear resistance of WC–Co and WC–AISI 304 composites by ball-cratering method,” *Wear*, vol. 346–347, pp. 99–107, Jan. 2016.
- [7] E. Lassner, W.-D. Schubert, E. Lassner, and W.-D. Schubert, “Tungsten in Hardmetals,” *Tungsten*, pp. 321–363, 1999.
- [8] L. Prakash, *Fundamentals and General Applications of Hardmetals*, vol. 1. Elsevier Ltd, 2014.
- [9] M. P. Groover, *Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System Fifth Edition*. 2012.
- [10] J. García, V. Collado Ciprés, A. Blomqvist, and B. Kaplan, “Cemented carbide microstructures: a review,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 80, no. August 2018, pp. 40–68, 2019.
- [11] “DURIT HARDMETALL. Tecnologia Metal Duro.” [Online]. Available: <https://www.durit.com/pt/tecnologia/metal-duro>. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [12] C. M. Fernandes and A. M. R. Senos, “Cemented carbide phase diagrams: A review,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 29, no. 4, pp. 405–418, 2011.

- [13] “IARC. List of Classification - IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans.” [Online]. Available: <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>. [Accessed: 16-Sep-2020].
- [14] “ECHA. Substance Information.” [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.028.325>. [Accessed: 16-Sep-2020].
- [15] “Nanalyze. Investing in the World’s Largest Producer of Cobalt.” [Online]. Available: <https://www.nanalyze.com/2018/03/investing-worlds-largest-producer-cobalt/>. [Accessed: 16-Sep-2020].
- [16] “Global Energy Metals Corp. Cobalt - Cobalt.” [Online]. Available: <https://www.globalenergymetals.com/cobalt/cobalt-matters/>. [Accessed: 16-Sep-2020].
- [17] V. A. Tracey, “Nickel in hardmetals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 137–149, 1992.
- [18] B. Uhrenius, “Phase diagrams as a tool for production and development of cemented carbides and steels,” *Powder Metall.*, vol. 35, no. 3, pp. 203–210, 1992.
- [19] I. J. Shon, I. K. Jeong, I. Y. Ko, J. M. Doh, and K. Do Woo, “Sintering behavior and mechanical properties of WC-10Co, WC-10Ni and WC-10Fe hard materials produced by high-frequency induction heated sintering,” *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 1, pp. 339–344, 2009.
- [20] C. Hanyaloglu, B. Aksakal, and J. D. Bolton, “Production and indentation analysis of WC/Fe-Mn as an alternative to cobalt-bonded hardmetals,” *Mater. Charact.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 315–322, 2001.
- [21] E. J. Wentzel and C. Allen, “The erosion-corrosion resistance of tungsten-carbide hard metals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 15, no. 1–3, pp. 81–87, 1997.
- [22] S. Hochstrasser(-Kurz), Y. Mueller, C. Latkoczy, S. Virtanen, and P. Schmutz, “Analytical characterization of the corrosion mechanisms of WC-Co by electrochemical methods and inductively coupled plasma mass spectroscopy,” *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 4, pp. 2002–2020, 2007.
- [23] A. B. Oliveira *et al.*, “Corrosion behaviour of WC-10% AISI 304 cemented carbides,” *Corros. Sci.*, vol. 100, pp. 322–331, 2015.
- [24] S. H. Chang and S. L. Chen, “Characterization and properties of sintered WC-Co

- and WC-Ni-Fe hard metal alloys,” *J. Alloys Compd.*, vol. 585, pp. 407–413, 2014.
- [25] B. J. Marques, C. M. Fernandes, and A. M. R. Senos, “Sintering, microstructure and properties of WC-AISI304 powder composites,” *J. Alloys Compd.*, vol. 562, pp. 164–170, 2013.
- [26] C. M. Fernandes, A. M. R. Senos, M. T. Vieira, and J. V. Fernandes, “Composites from WC powders sputter-deposited with iron rich binders,” *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 4, pp. 1617–1623, 2009.
- [27] C. M. Fernandes, A. M. R. Senos, and M. T. Vieira, “Particle surface properties of stainless steel-coated tungsten carbide powders,” *Powder Technol.*, vol. 164, no. 3, pp. 124–129, 2006.
- [28] C. M. Fernandes, A. M. R. Senos, and M. T. Vieira, “Control of eta carbide formation in tungsten carbide powders sputter-coated with (Fe/Ni/Cr),” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 310–317, 2007.
- [29] T. B. Trung, H. Zuhailawati, Z. A. Ahmad, and K. N. Ishihara, “Sintering characteristics and properties of WC-10AISI304 (stainless steel) hardmetals with added graphite,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 605, pp. 210–214, 2014.
- [30] “ISO. Hardmetals - Vickers Hardness Test.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/9484.html>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [31] “All About Cemented Carbide. Hardness.” [Online]. Available: <http://www.allaboutcementedcarbide.com/what-is-cemented-carbide/hardness/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [32] J. A. M. Ferreira, M. A. P. Amaral, F. V. Antunes, and J. D. M. Costa, “A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–8, 2009.
- [33] W. D. Schubert, H. Neumeister, G. Kingler, and B. Lux, “Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hardmetals,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 16, no. 2, pp. 133–142, 1998.
- [34] L. J. Prakash, “Application of fine grained tungsten carbide based cemented carbides,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 13, no. 5, pp. 257–264, 1995.
- [35] “GGB. Tribologia.” [Online]. Available: <https://www.ggbearings.com/pt/empresa/tribologia>. [Accessed: 22-Sep-2020].
- [36] P. J. Blau, “Fifty years of research on the wear of metals,” *Tribol. Int.*, vol. 30, no. 5,

- pp. 321–331, 1997.
- [37] K.-H. Z. B. T.-T. S. Gahr, Ed., “Chapter 6 Sliding Wear,” in *Microstructure and Wear of Materials*, vol. 10, Elsevier, 1987, pp. 351–495.
- [38] H. Engqvist, S. Ederyd, S. Hogmark, and B. Uhrenius, “The 15th International Plansee Seminar - SLIDING WEAR OF CEMENTED CARBIDES,” *Avtom. Svarka*, vol. 2, no. 8, pp. 64–65, 2001.
- [39] J. Pirso, S. Letunovič, and M. Viljus, “Friction and wear behaviour of cemented carbides,” *Wear*, vol. 257, no. 3–4, pp. 257–265, 2004.
- [40] J. Pirso, M. Viljus, and S. Letunovič, “Friction and dry sliding wear behaviour of cermets,” *Wear*, vol. 260, no. 7–8, pp. 815–824, 2006.
- [41] J. Larsen-Basse, “Binder extrusion in sliding wear of WC-Co alloys,” *Wear*, vol. 105, no. 3, pp. 247–256, 1985.
- [42] H. Engqvist, H. Högberg, G. A. Botton, S. Ederyd, and N. Axén, “Tribofilm formation on cemented carbides in dry sliding conformal contact,” *Wear*, vol. 239, no. 2, pp. 219–228, 2000.
- [43] Y. Liu, J. Cheng, B. Yin, S. Zhu, Z. Qiao, and J. Yang, “Study of the tribological behaviors and wear mechanisms of WC-Co and WC-Fe₃Al hard materials under dry sliding condition,” *Tribol. Int.*, vol. 109, pp. 19–25, 2017.
- [44] K. Jia and T. E. Fischer, “Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides,” *Wear*, vol. 203–204, pp. 310–318, 1997.
- [45] J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces,” *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953.
- [46] H. Czichos and W. O. Winer, “Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear (Tribology Series, 1),” *J. Lubr. Technol.*, vol. 100, no. 4, pp. 513–514, Oct. 1978.
- [47] “RGP BALLS. SFERE IN ACCIAIO AL CROMO AISI 52100 100Cr6.” [Online]. Available: <https://www.rgpballs.com/it/sfere-in-acciaio-al-cromo-aisi-52100-100cr6/>. [Accessed: 05-Oct-2020].
- [48] “CeramTec. Oxide Ceramics - Aluminum Oxide.” [Online]. Available: <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/aluminum-oxide/#>. [Accessed: 05-Oct-2020].
- [49] “Tribonet. Pin on Disk Test.” [Online]. Available:

- <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>. [Accessed: 06-Oct-2020].
- [50] D. K. Shetty, I. G. Wright, P. N. Mincer, and A. H. Clauer, “Indentation fracture of WC-Co cermets,” *J. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 5, pp. 1873–1882, 1985.
- [51] G. Quercia, I. Grigorescu, H. Contreras, C. Di Rauso, and D. Gutiérrez-Campos, “Friction and wear behavior of several hard materials,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 19, no. 4–6, pp. 359–369, 2001.
- [52] J. C. Miramontes, “Wear Resistance of Thermal Spray WC-Co-VC Nanostructured Coatings,” C. G. Tiburcio, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2016, p. Ch. 3.
- [53] “Infoescola. Calota Esférica.” [Online]. Available: <https://www.infoescola.com/geometria-espacial/calota-esferica/>. [Accessed: 10-Oct-2020].
- [54] Evans AG and Marshall DB, “Wear mechanisms in ceramics,” in *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*, Rigney DA, Ed. American Society for Metals, 1980, pp. 439–52.
- [55] S. Okamoto, Y. Nakazono, K. Otsuka, Y. Shimoitani, and J. Takada, “Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain size,” *Mater. Charact.*, vol. 55, no. 4–5, pp. 281–287, 2005.

APÊNDICE A – SISTEMA B

O sistema B é composto por um disco de WC-Co e uma esfera de Al_2O_3 . Na Tabela AA.0.1 são apresentadas as condições dos quatro ensaios realizados para este sistema tribológico.

Tabela AA.0.1. Condições dos ensaios do Sistema B.

Ensaio	Nº Rotações	Severidade (N·m)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
E5	36000	54287	22	33
E6	50000	62832	21	48
E7	72000	108573	23	31
E8	100000	150796	22	31

O grupo de ensaios do sistema B foram realizados segundo uma temperatura média de 22 °C, humidade relativa média de 37,8 % e variação de humidade relativa de ± 17 %.

Volume das Pistas de Desgaste

Na Tabela AA.0.2 são evidenciados os volumes das pistas de desgaste (V_p) e severidade correspondentes a cada ensaio do sistema B.

Tabela AA.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema B.

Ensaio	V_p (mm ³)	Severidade (N·m)
E5	6,278E-03	54287
E6	7,810E-03	62832
E7	1,000E-02	108573
E8	2,5341E-02	150796

Através da análise da Tabela AA.0.2, verifica-se que o volume da pista de desgaste aumenta com o aumento da severidade. O menor volume corresponde ao ensaio E5 com a menor severidade e, por oposição, o maior volume corresponde ao ensaio E8 com a maior severidade.

Coeficiente de Desgaste do Disco

Com base nos valores da Tabela AA.0.2 foi construído o gráfico de dispersão apresentado na Figura AA.1.

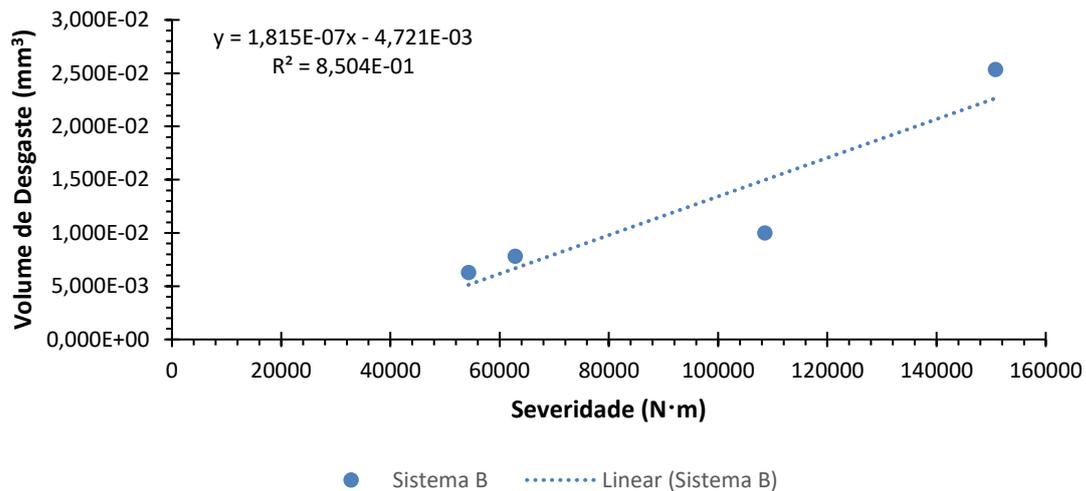


Figura AA.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema B.

Como referido antes, o declive da reta de regressão linear corresponde ao coeficiente de desgaste pretendido. Neste sistema B, o disco apresenta um coeficiente de desgaste de $1,815E-07 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. É também verificado para este sistema o aumento de volume de desgaste com o aumento da severidade, como previsto pela equação (3.7), no entanto, o volume de desgaste correspondente ao ensaio E7 encontra-se abaixo da tendência seguida pelos restantes ensaios. Todavia, o valor de 0,85 do coeficiente R^2 evidencia uma forte proporcionalidade linear direta entre o volume de desgaste do disco e a severidade para o sistema B.

Volume de Desgaste do Contra Corpo

Foram determinados os volumes de desgaste dos contra corpos (V_{cc}) correspondentes aos quatros ensaios do sistema B, encontrando-se expressos na Tabela AA.0.3.

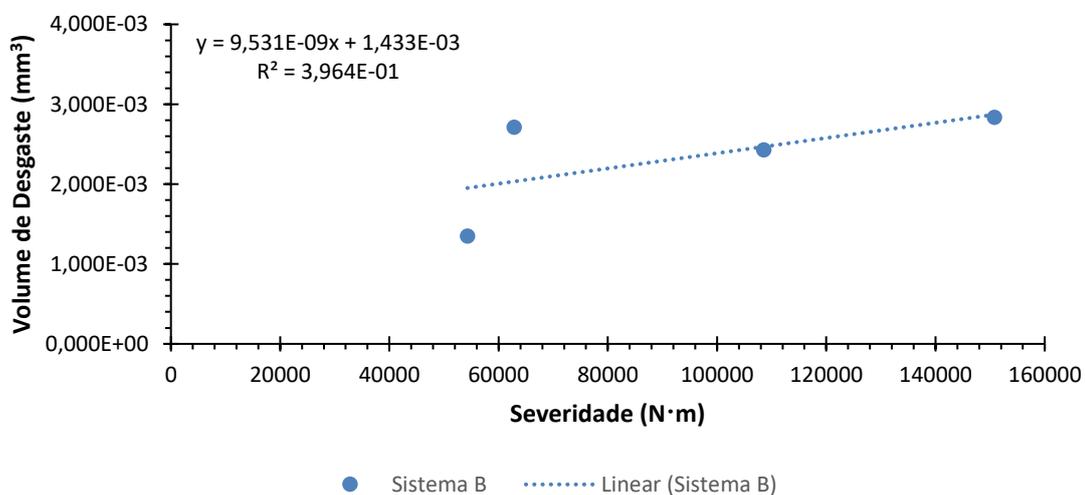
Tabela AA.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema B.

Ensaio	V _{cc} (mm ³)	Severidade (N·m)
E5	1,349E-03	54287
E6	2,713E-03	62832
E7	2,426E-03	108573
E8	2,834E-03	150796

Ao ensaio E5 corresponde o menor volume de desgaste do contra corpo para a menor severidade. Em contrapartida, ao ensaio E8 corresponde ao maior volume de desgaste para a severidade máxima. Contudo, o ensaio E6 comparativamente ao E7, apresenta maior volume de desgaste para um valor de severidade menor.

Coeficiente de Desgaste do Contra Corpo

De modo a poder ser determinado o coeficiente de desgaste do contra corpo foram representando os dados da Tabela AA.0.3 num gráfico de dispersão de volume de desgaste do contra corpo em função da severidade. O gráfico mencionado encontra-se ilustrado na Figura AA.2.

**Figura AA.2.** Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema B.

No caso do contra corpo do sistema B, o coeficiente de desgaste corresponde a $9,531E-09$ mm³/N·m. Neste sistema é indiciada uma fraca relação de proporcionalidade linear entre o volume de desgaste do contra corpo e a severidade pelo coeficiente R^2 de 0,39.

Curvas de Atrito

A construção das curvas de atrito foi realizada com base nos dados recolhidos no tribómetro pino e disco. Na Figura AA.3 podem ser observadas as curvas de atrito correspondentes aos ensaios do sistema B.

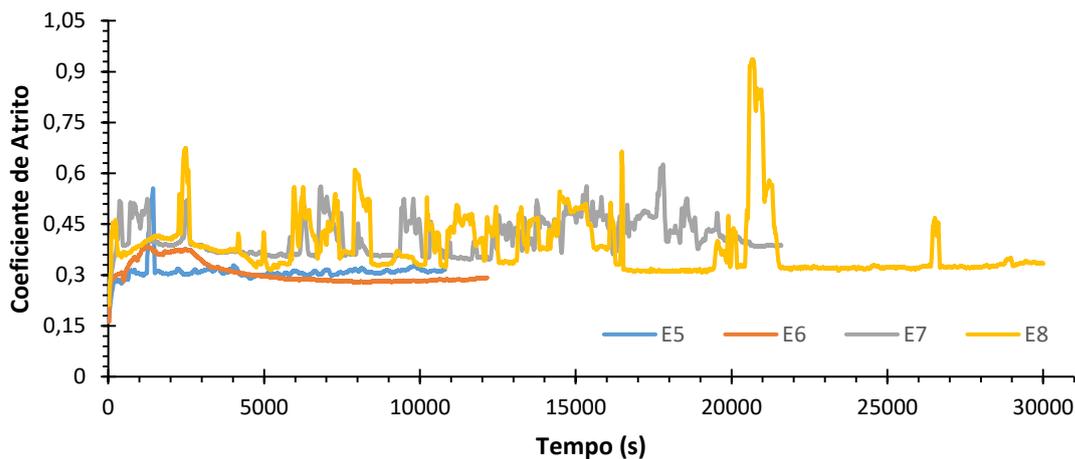


Figura AA.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema B.

Analisando o gráfico apresentado na Figura AA.3 pode observar-se que as curvas correspondentes aos ensaios E5 e E6 manifestam um comportamento mais estável ao passo que as curvas dos ensaios E7 e E8 evidenciam múltiplos picos ao longo do tempo.

Coeficiente de Atrito Médio

Na Figura AA.4 são exibidos os coeficientes de atrito médio dos ensaios do sistema B, determinados com recurso à média aritmética do conjunto de coeficientes de atrito instantâneos de cada teste tribológico.

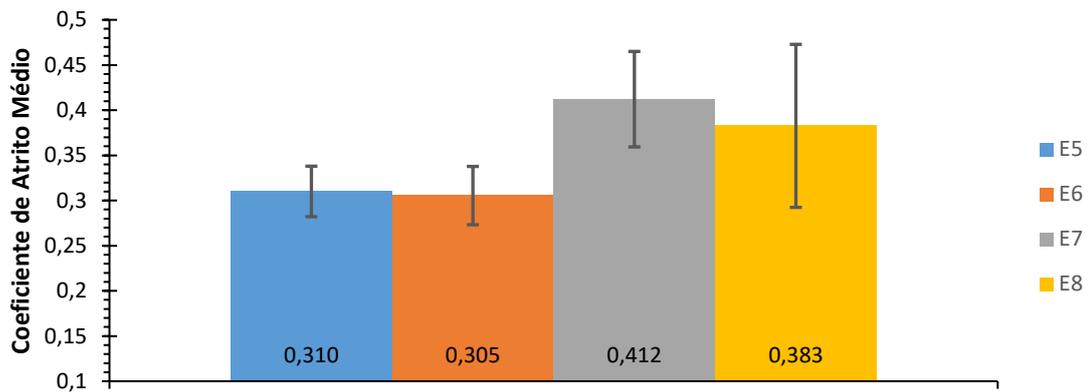


Figura AA.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema B.

Analisando a Figura AA.4 verifica-se que os coeficientes de atrito médio dos ensaios E5 e E6 são muito próximos, sendo os dos restantes ensaios superiores. O menor coeficiente de atrito médio ocorre para o ensaio E6 com o valor de 0,305. Em contrapartida, no ensaio E7 verifica-se o maior coeficiente de atrito médio correspondente a 0,412. Tendo em conta os quatro coeficientes de atrito médio dos ensaios do sistema B determinados, não é visível nenhuma influência da distância de deslizamento, ou severidade, sobre os mesmos.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

De modo a complementar e enquadrar o coeficiente de atrito médio de cada ensaio, são apresentados na Tabela AA.0.4 e ilustrados na Figura AA.4 os coeficientes de atrito médio bem como as respetivas variações.

Tabela AA.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema B.

Ensaio	μ_{med}	$\Delta\mu$
E5	0,310	0,028
E6	0,305	0,032
E7	0,412	0,053
E8	0,383	0,090

No sistema B a menor variação do coeficiente de atrito ocorre para o ensaio E5 fixando-se no valor de 0,028. No ensaio E8 verificou-se a maior variação do coeficiente de atrito com o valor de 0,090, sendo este bastante superior aos restantes.

APÊNDICE B – SISTEMA C

O sistema C é composto por um disco de WC-SS e uma esfera de aço AISI L3. Na Tabela AB.0.1 são apresentadas as condições dos quatro ensaios realizados para este sistema tribológico.

Tabela AB.0.1. Condições dos ensaios do Sistema C.

Ensaio	Nº Rotações	Severidade (N·m)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
E9	50000	50265	23	37
E10	72000	72382	23	51
E11	85000	85451	23	49
E12	100000	100531	23	49

O quarteto de ensaios do sistema C foram realizados segundo uma temperatura média de 23 °C, humidade relativa média de 46.5 % e variação de humidade relativa de ± 14 %.

Volume das Pistas de Desgaste

Na Tabela AB.0.2 são evidenciados os volumes das pistas de desgaste (V_p) e severidade correspondentes a cada ensaio do sistema C.

Tabela AB.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema C.

Ensaio	V_p (mm ³)	Severidade (N·m)
E9	8,403E-03	50265
E10	7,608E-03	72382
E11	1,267E-02	85451
E12	2,335E-02	100531

Através da análise da Tabela AB.0.2, verifica-se que o menor volume corresponde ao ensaio E9 para a menor severidade e o maior volume corresponde ao ensaio E12 com a maior severidade. O ensaio E10, comparativamente ao E9, apresenta menor volume da pista de desgaste para uma severidade superior. É de referir também que a

humidade relativa no início do ensaio E10 é 14% superior à verificada no início do ensaio E9, o que poderá justificar o menor volume obtido para uma severidade superior.

Coefficiente de Desgaste do Disco

Com base nos valores da Tabela AB.0.2 foi construído o gráfico de dispersão apresentado na Figura AB.1.

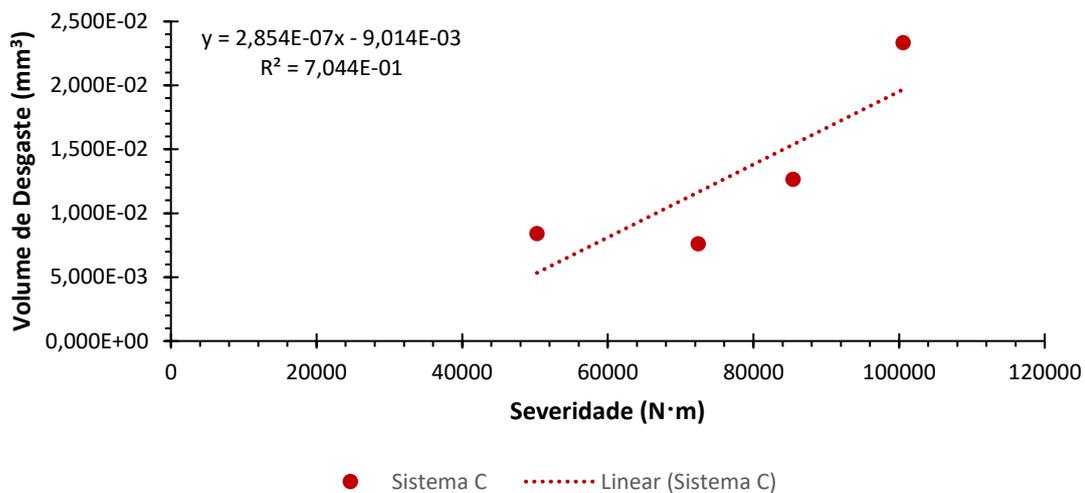


Figura AB.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema C.

Como referido anteriormente, o declive da reta de regressão linear corresponde ao coeficiente de desgaste pretendido. Neste sistema C, o disco apresenta um coeficiente de desgaste de $2,854E-07 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Para este sistema é obtido um R^2 de 0,70 que evidenciada uma razoável proporcionalidade linear entre o volume de desgaste do disco e a severidade.

Volume de Desgaste do Contra Corpo

Foram determinados os volumes de desgaste dos contra corpos (V_{cc}) correspondentes aos ensaios do sistema C, encontrando-se expressos na Tabela AB.0.3.

Tabela AB.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema C.

Ensaio	V_{cc} (mm ³)	Severidade (N·m)
E9	1,952E-02	50265
E10	2,591E-02	72382
E11	6,575E-03	85451
E12	8,004E-02	100531

Ao ensaio E11 corresponde o menor volume de desgaste do contra corpo para a segunda maior severidade. Em contrapartida, ao ensaio E12 corresponde ao maior volume de desgaste para a severidade máxima.

Coeficiente de Desgaste do Contra Corpo

De modo a poder ser determinado o coeficiente de desgaste do contra corpo foram representando os dados da Tabela AB.0.3 num gráfico de dispersão de volume de desgaste do contra corpo em função da severidade. O gráfico mencionado encontra-se ilustrado na Figura AB.2.

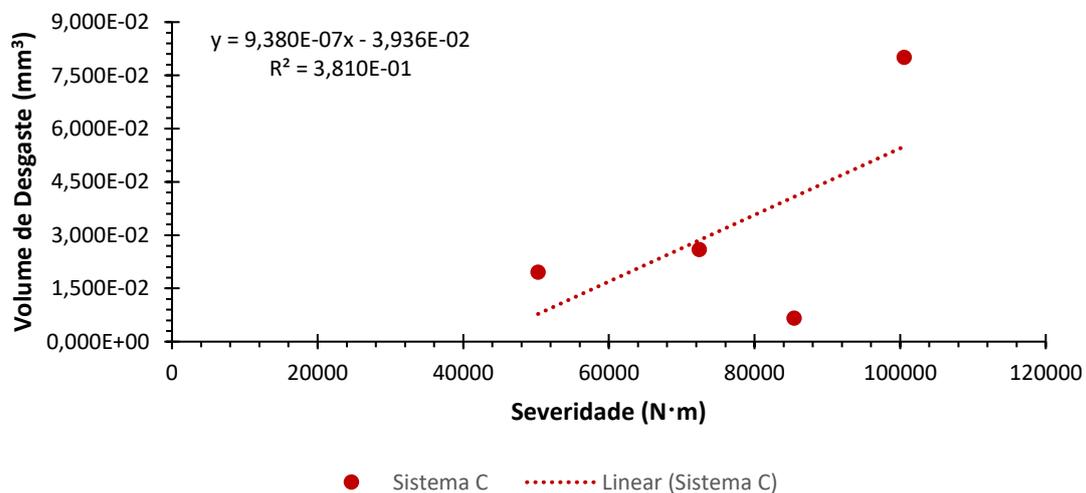


Figura AB.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema C.

No caso do contra corpo do sistema C, o coeficiente de desgaste corresponde a $9,380E-07$ mm³/N·m. Uma fraca relação de proporcionalidade linear entre o volume de desgaste do contra corpo e a severidade é manifestada para o sistema C pelo coeficiente R^2 de 0,38.

Curvas de Atrito

A construção das curvas de atrito dos ensaios que compõem o sistema C foi realizada com base nos dados recolhidos no tribómetro pino e disco. Na Figura AB.3 podem ser observadas as curvas de atrito correspondentes aos ensaios do sistema C.

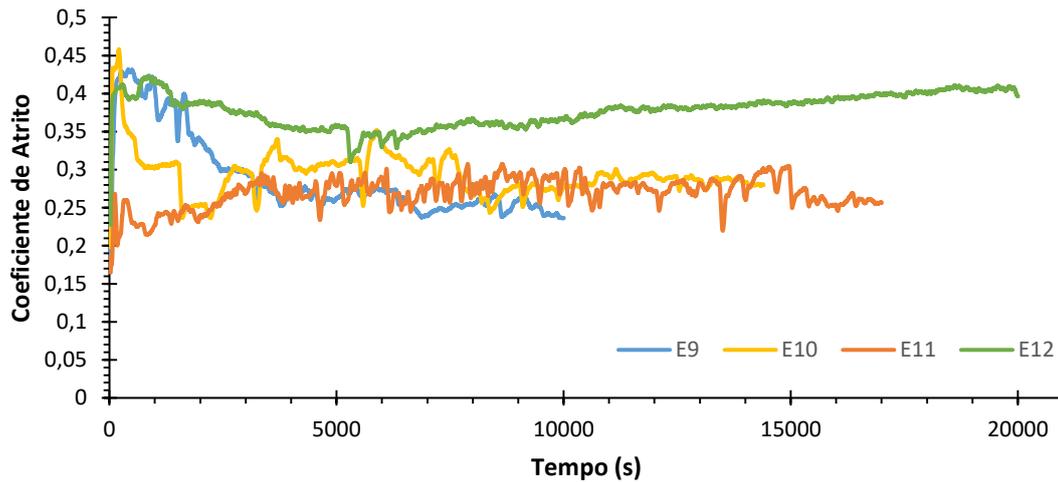


Figura AB.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema C.

Analisando o gráfico apresentado na Figura AB.3 pode observar-se que as curvas de atrito correspondentes aos ensaios E9, E10 e E11 evidenciam múltiplos picos ao longo do tempo. Já a curva de atrito pertencente ao ensaio E12 evidência menos picos e encontra-se acima das restantes durante a sua extensão.

Coeficiente de Atrito Médio

Na Figura AB.4 são exibidos os coeficientes de atrito médio dos ensaios do sistema C, determinados com recurso à média aritmética do conjunto de coeficientes de atrito instantâneos de cada teste tribológico.

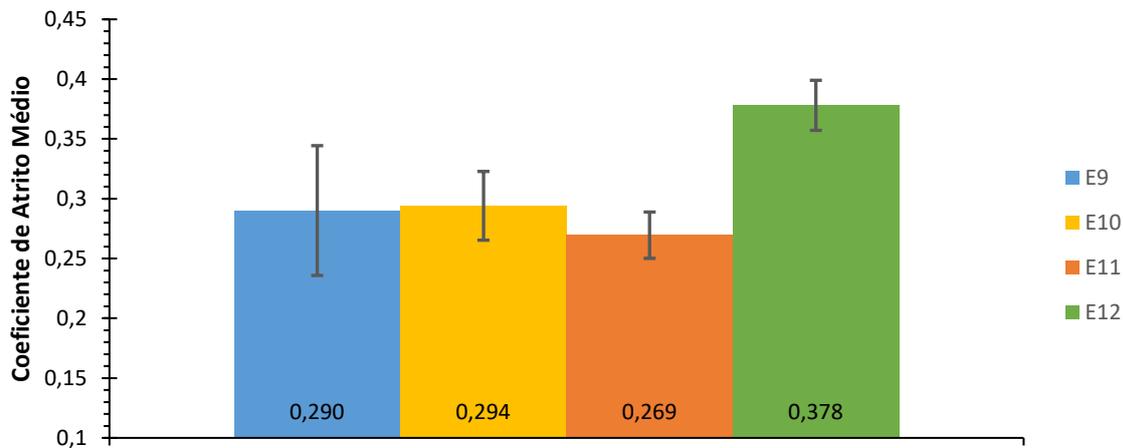


Figura AB.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema C.

Ao analisar a Figura AB.4 pode-se observar que o menor coeficiente de atrito médio diz respeito ao ensaio E11. Os ensaios E9 e E10 apresentam coeficientes de atrito médio muito próximos de 0,290 e 0,294 respetivamente. No caso do ensaio E12 verifica-se o maior coeficiente de atrito médio, com o valor de 0,378, sendo este bastante superior aos restantes do sistema C.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

De modo a complementar e enquadrar o coeficiente de atrito médio de cada ensaio, são apresentados na Tabela AB.0.4 e ilustrados na Figura AB.4 os coeficientes de atrito médio bem como as respetivas variações.

Tabela AB.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema C.

Ensaio	μ_{med}	$\Delta\mu$
E9	0,290	0,054
E10	0,294	0,029
E11	0,269	0,019
E12	0,378	0,021

No sistema C a menor variação do coeficiente de atrito ocorre para o ensaio E11 fixando-se no valor de 0,019. Já no ensaio E9 verificou-se a maior variação do coeficiente de atrito com o valor de 0,054, sendo esta variação bastante superior às restantes.

APÊNDICE C – SISTEMA D

O sistema D é composto por um disco de WC-SS e uma esfera de Al_2O_3 . Na Tabela AC.0.1 são apresentadas as condições dos quatro ensaios realizados para este sistema tribológico.

Tabela AC.0.1. Condições dos ensaios do Sistema D.

Ensaio	Nº Rotações	Severidade (N·m)	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
E13	50000	37699	24	43
E14	72000	54287	26	34
E15	85000	64088	25	33
E16	100000	100531	25	42

O grupo de ensaios do sistema D foram realizados segundo uma temperatura média de 25 °C, humidade relativa média de 38 % e variação de humidade relativa de ± 10 %.

Volume das Pistas de Desgaste

Na Tabela AC.0.2 são apresentados os volumes das pistas de desgaste (V_p) e severidade correspondentes a cada ensaio do sistema D.

Tabela AC.0.2. Volume das pistas de desgaste e severidade dos ensaios do sistema D.

Ensaio	V_p (mm ³)	Severidade (N·m)
E13	1,192E-02	37699
E14	1,263E-02	54287
E15	1,242E-02	64088
E16	3,403E-02	100531

É possível observar na Tabela AC.0.2 que o menor volume da pista de desgaste corresponde ao ensaio E13 para a menor severidade. Também é visível que o maior volume diz respeito ao ensaio E16 correspondendo à maior severidade do sistema em análise. De notar que o ensaio E14, em comparação com o E15, apresenta um volume superior para uma severidade inferior.

Coefficiente de Desgaste do Disco

Com base nos valores da Tabela AC.0.2 foi construído o gráfico de dispersão apresentado na Figura AC.1.

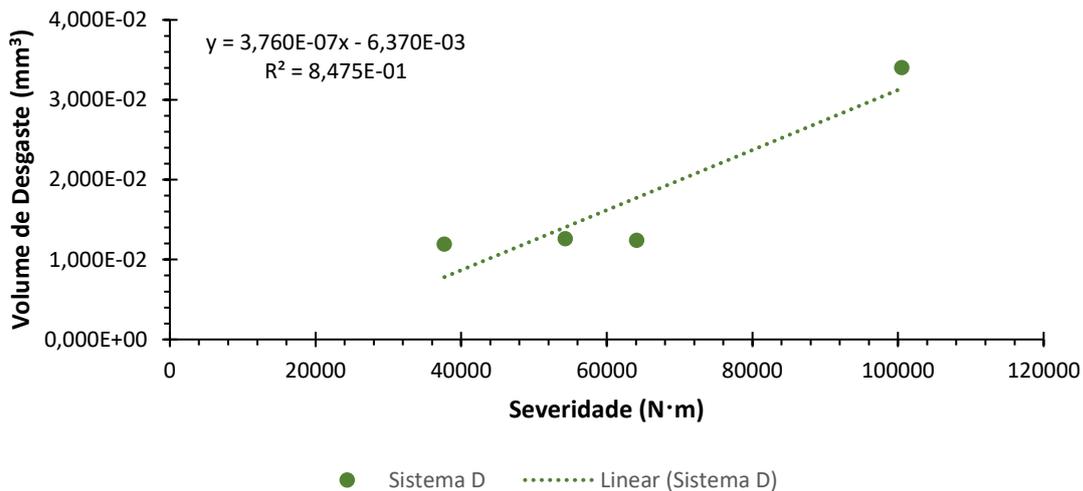


Figura AC.1. Coeficiente de desgaste do disco do sistema D.

Como referido anteriormente, o declive da reta de regressão linear corresponde ao coeficiente de desgaste do disco. Neste sistema D, o disco apresenta um coeficiente de desgaste de $3,760E-07 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Para este sistema é obtido um coeficiente R^2 de 0.84, evidenciando uma forte proporcionalidade linear direta entre o volume de desgaste do disco e a severidade. Contudo o ensaio E15 encontra-se mais desfasado da tendência seguida pelos demais ensaios.

Volume de Desgaste do Contra Corpo

Os volumes de desgaste dos contra corpos (V_{cc}) correspondentes aos ensaios do sistema D foram determinados, encontrando-se expressos na Tabela AC.0.3.

Tabela AC.0.3. Volume de desgaste do contra corpo e severidade dos ensaios do sistema D.

Ensaio	V_{cc} (mm ³)	Severidade (N·m)
E13	1,702E-02	37699
E14	2,263E-02	54287
E15	3,640E-02	64088
E16	2,306E-02	100531

Através da observação da Tabela AC.0.3 constata-se que ao ensaio E13 coincide o menor volume de desgaste do contra corpo para a menor severidade do sistema D. De outra forma, ao ensaio E15 é correspondido o maior volume para a segunda maior severidade.

Coeficiente de Desgaste do Contra Corpo

De modo a poder ser determinado o coeficiente de desgaste do contra corpo foram representando os dados da Tabela AC.0.3 num gráfico de dispersão de volume de desgaste do contra corpo em função da severidade. O gráfico mencionado encontra-se ilustrado na Figura AC.2.

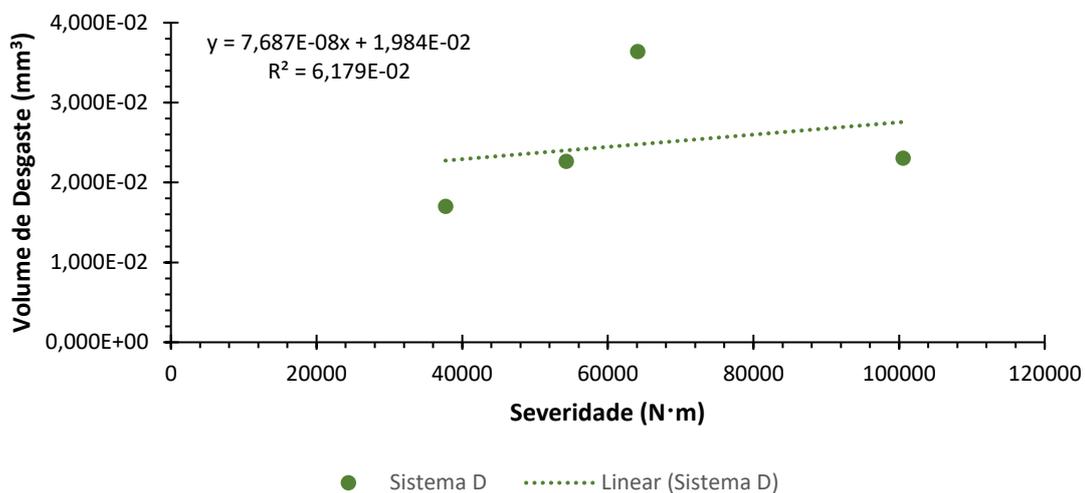


Figura AC.2. Coeficiente de desgaste do contra corpo do sistema D.

No caso do contra corpo do sistema D, o coeficiente de desgaste corresponde a $7,687E-08 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Para este sistema pode-se considerar que existe alguma relação de proporcionalidade linear entre o volume de desgaste do contra corpo e a severidade pela avaliação do coeficiente R^2 de 0,61.

Curvas de Atrito

A construção das curvas de atrito dos ensaios que compõem o sistema D foi realizada com base nos dados recolhidos no tribómetro pino e disco. Na Figura AC.3 podem ser observadas as curvas de atrito correspondentes aos ensaios do sistema D.

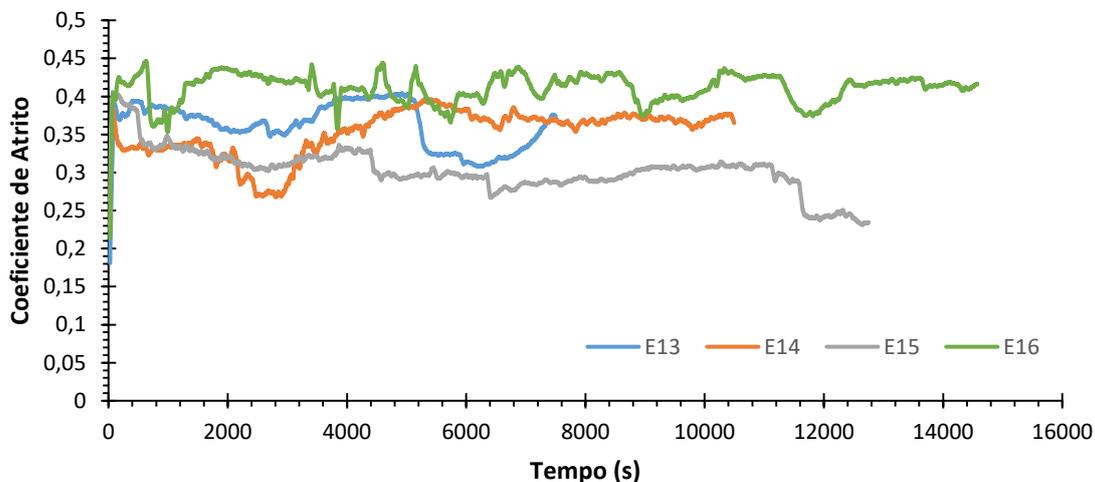


Figura AC.3. Curvas de atrito dos ensaios do sistema D.

Analisando o gráfico apresentado na Figura AC.3 pode observar-se que a curva de atrito correspondente ao ensaio E16 apresenta-se superior às restantes. É também verificado que todas as curvas não evidenciam um comportamento estável, apresentando flutuações ao longo do tempo.

Coeficiente de Atrito Médio

Na Figura AC.4 são exibidos os coeficientes de atrito médio dos ensaios do sistema D, determinados com recurso à média aritmética do conjunto de coeficientes de atrito instantâneos de cada teste tribológico.

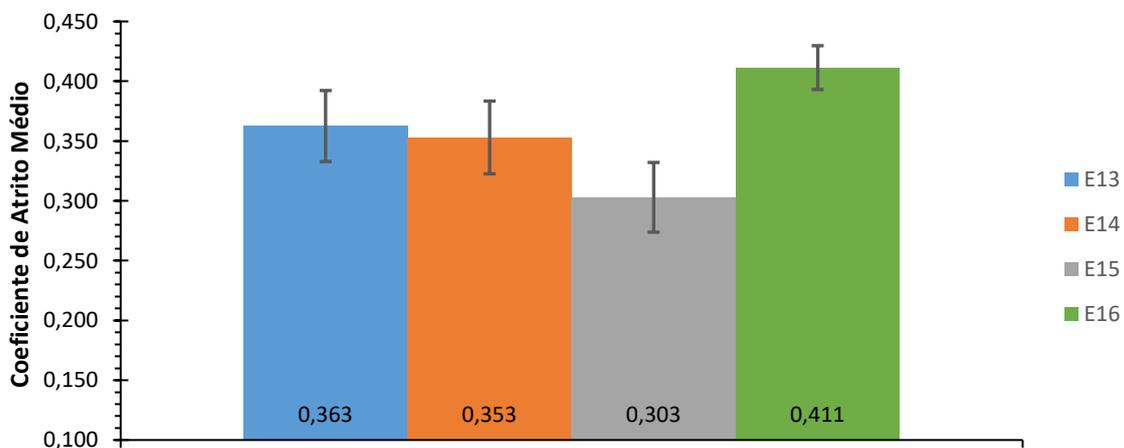


Figura AC.4. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos ensaios do sistema D.

Ao analisar a Figura AC.4 pode-se observar que o menor coeficiente de atrito médio diz respeito ao ensaio E15. Os ensaios E13 e E14 apresentam coeficientes de atrito médio próximos de 0,363 e 0,353 respetivamente. No caso do ensaio E16 verifica-se o maior coeficiente de atrito médio, com o valor de 0,411, sendo este bastante superior aos restantes do sistema D.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

De modo a complementar e enquadrar o coeficiente de atrito médio de cada ensaio, são apresentados na Tabela AC.0.4 e ilustrados na Figura AC.4 os coeficientes de atrito médio bem como as respetivas variações.

Tabela AC.0.4. Variação do Coeficiente de atrito do sistema D.

Ensaio	μ_{med}	$\Delta\mu$
E13	0,363	0,030
E14	0,353	0,030
E15	0,303	0,029
E16	0,411	0,018

No sistema D a menor variação do coeficiente de atrito ocorre para o ensaio E16 fixando-se no valor de 0,018. Os ensaios E13 e E14 apresentam a variação do coeficiente de atrito com o valor de 0,030 e o ensaio E15 com uma variação muito próxima de 0,029.

APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS A E B

O sistema A é composto por um disco de WC-Co e uma esfera de aço AISI L3 enquanto que o sistema B é formado por um disco de WC-Co e uma esfera de Al₂O₃. Visto que ambos os sistemas fazem uso de uma amostra de WC-Co, diferindo no contra corpo utilizado, a comparação entre estes é importante pois permite estudar a influência do contra corpo.

No que diz respeito às condições do meio envolvente onde foram realizados os ensaios tribológicos, os sistemas apresentam temperaturas médias semelhantes, diferindo apenas 0,7 °C entre ambos. A humidade relativa média difere também 0,7 % entre sistemas, no entanto no sistema B a variação da mesma corresponde a ± 17 % enquanto que no sistema A é de ± 10 %.

Coeficiente de Desgaste dos Discos

O coeficiente de desgaste permite caraterizar a evolução do desgaste. Na Figura AD.1 são apresentadas as linhas de tendência dos dois sistemas a partir das quais são determinados os respetivos coeficientes de desgaste.

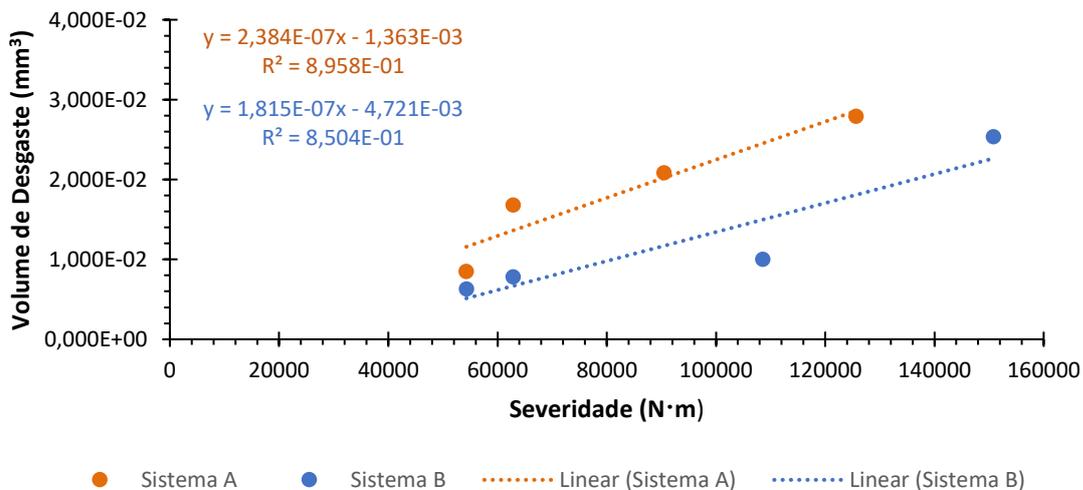


Figura AD.1. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas A e B.

Numa primeira análise aos coeficientes de desgaste dos discos de WC-Co, verifica-se que apresentam a mesma ordem de grandeza. Também se verifica que o sistema A, que faz uso do contra corpo de AISI L3, apresenta um coeficiente de desgaste do disco 31 % superior comparativamente ao sistema B em que é utilizado um contra corpo de Al_2O_3 .

Observa-se ainda que o sistema A evidencia uma relação de proporcionalidade linear mais forte em comparação com o sistema B.

Coeficiente de Desgaste dos Contra Corpos

Da mesma forma, agora para o caso dos contra corpos, são apresentadas na Figura AD.2 as linhas de tendência dos dois sistemas a partir das quais são determinados os respetivos coeficientes de desgaste.

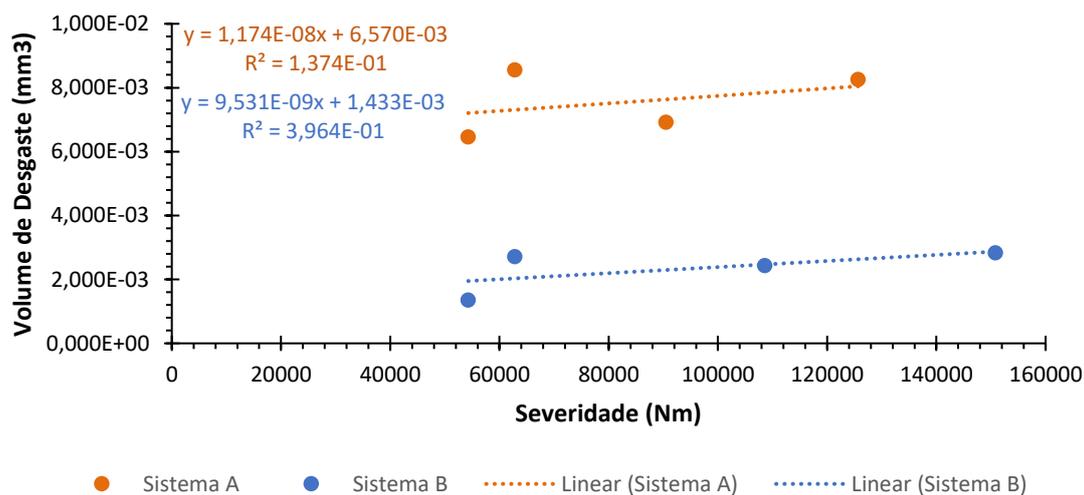


Figura AD.2. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas A e B.

A partir da Figura AD.2 é possível perceber que o sistema B comparativamente ao A apresenta uma relação de proporcionalidade linear superior, sendo esta, no entanto, ainda baixa. O coeficiente de desgaste do contra corpo de AISI L3 do sistema A é cerca de 23 % superior ao contra corpo de Al_2O_3 do sistema B.

Coeficiente de Atrito Médio

De modo a ser possível realizar uma comparação foi determinado um novo coeficiente de atrito médio para cada sistema. Este tem como base a média aritmética dos respetivos coeficientes de atrito médio dos vários ensaios.

Na Figura AD.3 são exibidos os coeficientes de atrito médio correspondentes aos sistemas A e B.

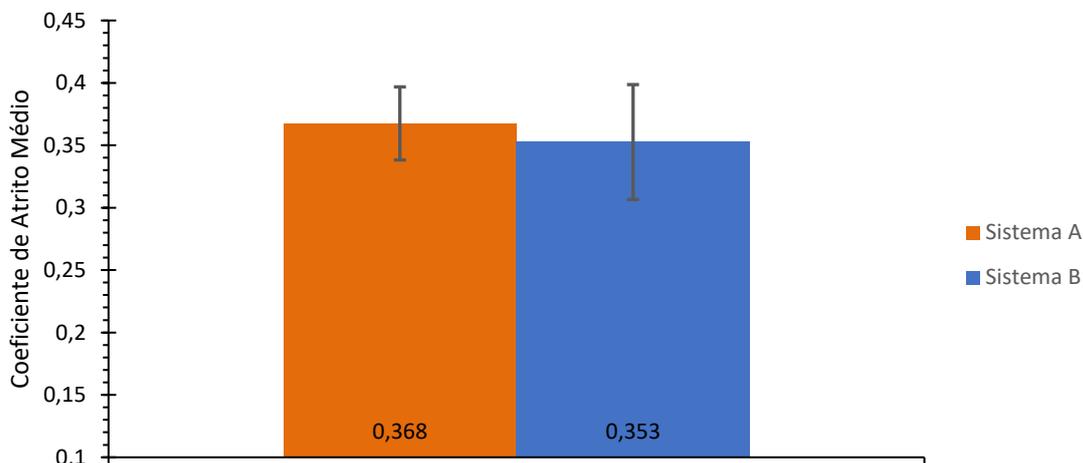


Figura AD.3. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas A e B.

Ao analisar a Figura AD.3 pode-se observar que o menor coeficiente de atrito médio diz respeito ao sistema B com o valor de 0,353. O sistema A, comparativamente ao anterior, apresenta um coeficiente de atrito médio 4 % superior com o valor de 0,368.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

São apresentados na Tabela AD.0.1 e ilustrados na Figura AD.3 os coeficientes de atrito médio de cada sistema bem como as respectivas variações.

Tabela AD.0.1. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas A e B.

Sistema	μ_{med}	$\Delta\mu$
A	0,368	0,029
B	0,353	0,046

No sistema A ocorre a menor variação do coeficiente de atrito fixando-se no valor de 0,029. No sistema B verificou-se uma variação bastante superior do coeficiente de atrito com o valor de 0,046.

APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS C E D

O sistema C é composto por um disco de WC-SS e uma esfera de aço AISI L3, já o sistema D é formado por um disco de WC-SS e uma esfera de Al_2O_3 . A comparação entre estes sistemas permite estudar a influência do contra corpo, neste caso para a amostra de WC-SS.

No que diz respeito às condições do meio envolvente onde foram realizados os ensaios tribológicos, os sistemas apresentam temperaturas médias semelhantes, diferindo apenas 2 °C entre ambos. A humidade relativa média do sistema C é 8,5 % superior ao sistema D. Já a variação da humidade relativa média no sistema C corresponde a ± 14 % enquanto que no sistema D é de ± 10 %.

Coeficiente de Desgaste dos Discos

O coeficiente de desgaste permite caracterizar a evolução do desgaste. Na Figura AE.1 são apresentadas as linhas de tendência dos dois sistemas a partir das quais são determinados os respetivos coeficientes de desgaste.

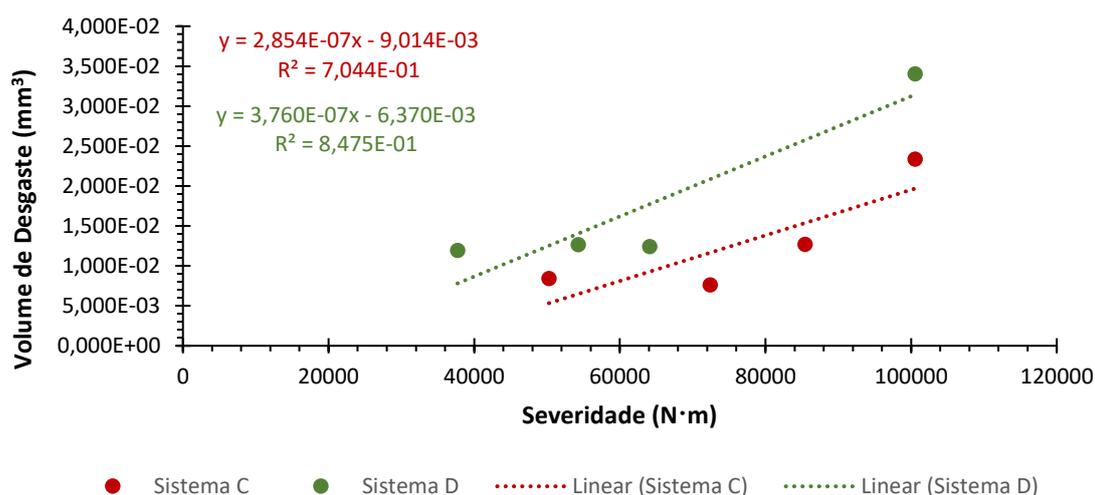


Figura AE.1. Coeficientes de desgaste dos discos dos sistemas C e D.

Numa primeira análise aos coeficientes de desgaste dos discos de WC-SS, verifica-se que apresentam a mesma ordem de grandeza. Também se verifica que o sistema

D, que faz uso do contra corpo de Al_2O_3 , apresenta um coeficiente de desgaste do disco 32 % superior comparativamente ao sistema C em que é utilizado um contra corpo de AISI L3.

Observa-se ainda que o sistema C evidencia uma relação de proporcionalidade linear mais forte em comparação com o sistema D.

Coefficiente de Desgaste dos Contra Corpos

Da mesma forma, agora para o caso dos contra corpos, são apresentadas na Figura AE.2 as linhas de tendência dos dois sistemas a partir das quais são determinados os respectivos coeficientes de desgaste.

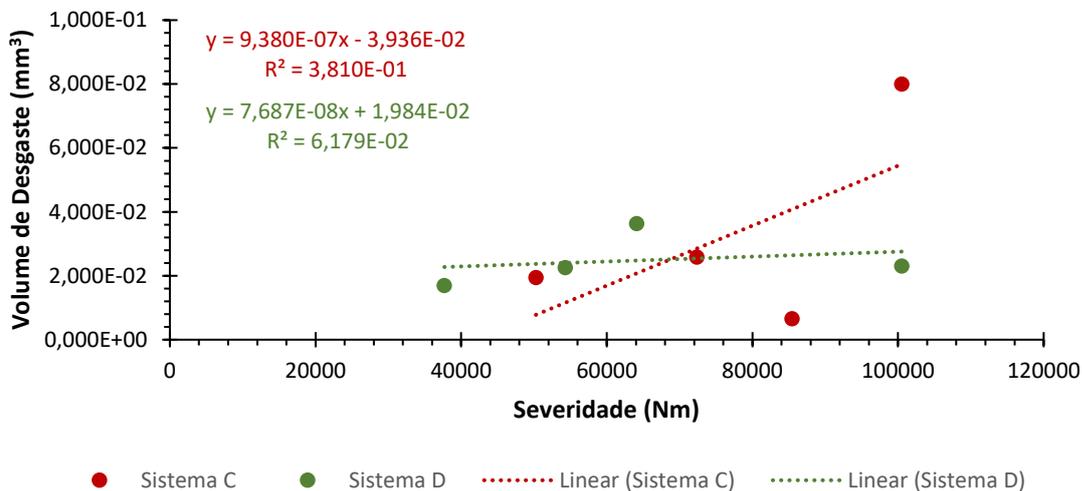


Figura AE.2. Coeficientes de desgaste dos contra corpos dos sistemas C e D.

A partir da Figura AE.2 é possível perceber que o sistema D comparativamente ao C apresenta uma relação de proporcionalidade linear superior, sendo esta, no entanto, ainda um pouco baixa. O coeficiente de desgaste do contra corpo de AISI L3 do sistema C é cerca de 1120 % superior ao coeficiente de desgaste do contra corpo de Al_2O_3 do sistema D.

Coefficiente de Atrito Médio

De modo a ser possível realizar uma comparação foi determinado um novo coeficiente de atrito médio para cada sistema. Este tem como base a média aritmética dos respectivos coeficientes de atrito médio dos vários ensaios.

Na Figura AE.3 são exibidos os coeficientes de atrito médio correspondentes aos sistemas C e D.

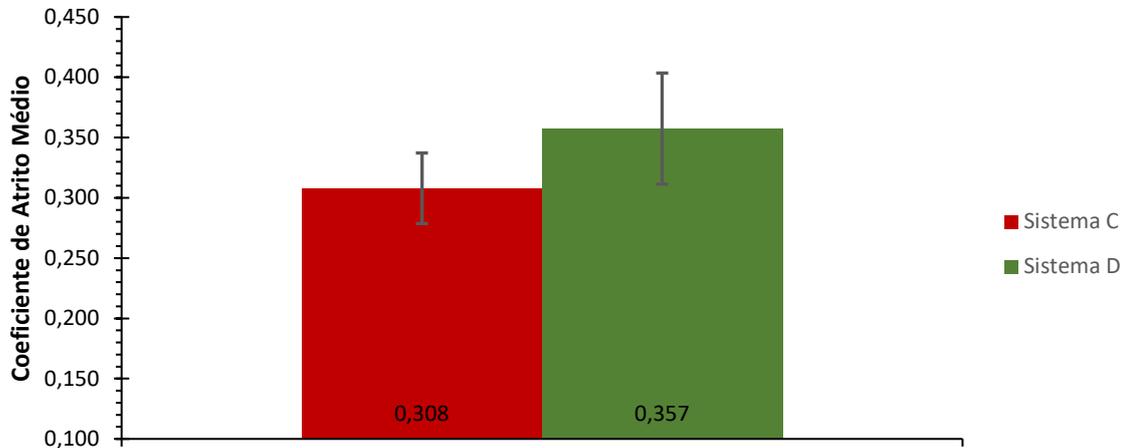


Figura AE.3. Coeficiente de atrito médio e variação do coeficiente de atrito médio dos sistemas C e D.

Ao analisar a Figura AE.3 pode-se observar que o menor coeficiente de atrito médio diz respeito ao sistema C com o valor de 0,308. O sistema D, comparativamente ao anterior, apresenta um coeficiente de atrito médio 16 % superior com o valor de 0,357.

Variação do Coeficiente de Atrito Médio

São apresentados na Tabela AE.0.1 e ilustrados na Figura AE.3 os coeficientes de atrito médio de cada sistema bem como as respectivas variações.

Tabela AE.0.1. Variação dos coeficientes de atrito dos sistemas C e D.

Sistema	μ_{med}	$\Delta\mu$
C	0,308	0,042
D	0,357	0,038

No sistema D ocorre a menor variação do coeficiente de atrito fixando-se no valor de 0,038. No sistema C verificou-se uma variação do coeficiente de atrito ligeiramente superior com o valor de 0,042.

