



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE E DA EFICIÊNCIA DE CORRENTES DE TRANSMISSÃO PARA BICICLETA POR APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS PVD

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

Autor

Miguel Alberto Pereira Esteves

Orientador

Prof. Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Co-Orientador

**Prof. Doutor Albano Augusto Cavaleiro Rodrigues de
Carvalho**

Júri

Presidente	Doutor João Carlos Barbas de Oliveira Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho Professor Associado da Universidade de Coimbra Professor Doutor Albano Augusto Cavaleiro Rodrigues de Carvalho
Vogais	Professor Catedrático da Universidade de Coimbra Eng^o Pedro Miguel Nunes dos Santos Engenheiro da SRAMPORT, Lda. Doutor Tomas Polcar Investigador do CEMUC da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2011

Um teste vale mais que mil opiniões.

Baldwin Testing Company

Aos meus pais.

Agradecimentos

O presente espaço servirá para prestar um pequeno agradecimento a todos que fizeram parte da jornada académica que termina com a realização do presente trabalho. Em especial envio um agradecimento:

Ao Senhor Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, pelo apoio, a competência com que me orientou, a doura dedicação, o tempo despendido, os valiosos conhecimentos transmitidos e disponibilização dos recursos necessários.

Ao Senhor Professor Doutor Albano Augusto Cavaleiro Rodrigues de Carvalho, pela disponibilização dos materiais e processos e pelo aconselhamento.

Ao grupo de Construções Mecânicas, que disponibilizou as instalações e os equipamentos necessários.

À empresa SRAMPort na pessoa do Senhor Engenheiro Pedro Miguel Nunes dos Santos pelos componentes fornecidos, pela informação disponibilizada e apoio no seguimento do processo.

Aos meus amigos pela confiança que depositaram em mim, pelos momentos de festa e pelo espírito académico.

À minha mãe e à minha irmã pelos valores e apoio incondicional, ao meu sobrinho pela alegria e ao meu pai por ser a minha fonte de inspiração. À minha família que esteve sempre presente nesta minha caminhada.

E claro, à Iolanda pelo apoio incondicional e confiança que depositou em mim durante todo o percurso.

Resumo

A presente dissertação tem como objectivo o estudo de tratamentos de superfície a aplicar aos eixos de corrente de bicicleta com o intuito de obter maior resistência ao desgaste.

Numa fase inicial foram estudados os mecanismos de desgaste presentes em correntes de bicicleta quando funcionam em condições de serviço para posteriormente serem reproduzidos em laboratório.

A escolha do tipo de ensaios a realizar, bem como das condições de ensaio, pendeu do tipo de desgaste e dos materiais aplicados nos componentes, sendo que outros estudos já realizados forneceram informação decisiva para a fixação das condições de ensaio em laboratório.

A abrasão foi identificada como a principal causa de desgaste, justificando-se que o primeiro tipo de ensaio aplicado foi de desgaste por abrasão com o intuito de determinar parâmetros de desgaste que possibilitassem uma comparação directa entre materiais, nomeadamente a taxa específica de desgaste. Inicialmente foram caracterizados os substratos e posteriormente alguns revestimentos.

Conclui-se que seriam necessários ensaios alternativos de escorregamento para a completa caracterização dos revestimentos. Reformulou-se o modelo experimental introduzindo complementarmente a técnica de ensaios alternativos.

Os resultados experimentais foram avaliados aplicando modelos de tratamento de dados, previamente seleccionadas, como o modelo linear de Archard-Czichos para desgaste, o modelo de atrito de Amontons-Coulomb e uma abordagem energética para relacionar atrito e desgaste.

Finalmente foram comparados os resultados dos vários materiais com o objectivo de avaliar da eficiência das novas soluções.

Palavras-chave: Desgaste; Abrasão; Revestimento; Escorregamento;

Abstract

This dissertation aims to study some surface treatments in order to verify their ability to be applied on bike chain axes to achieve greater wear resistance.

In a first step, the wear mechanisms present in bicycle chains when tested on service conditions were studied, to be used to validate the laboratory test results.

The choice of bench tests types and test conditions, was based on the type of wear and the materials used in components, and from the experience acquired by other previous studies who provided crucial information.

The abrasion was identified as the main cause of wear, reasoning that the first type of test applied was abrasion test in order to determine parameters of wear that would enable a direct comparison between materials. Initially the substrates were characterized and then a few available coatings.

Alternative slip tests are also used to obtain a complete characterization of the coatings. The experimental model was reformulated by introducing a complementary experimental technique of alternative sliding.

The experimental results were estimated by applying data processing models, previously selected, as the linear model of Archard-Czichos for wear, the Amontons-Coulomb model for friction and an energetic approach to relate friction and wear.

Finally the results of various materials were compared in order to evaluate the efficiency of new solutions.

Keywords Bicycle chain; Wear; Abrasion; Coating;

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia.....	viii
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Correntes e Transmissão	3
2.2. Modos de Desgaste	4
2.2.1. Dureza.....	6
2.2.2. Agentes Abrasivos.....	6
2.3. Fricção	8
2.3.1. Paliativos	9
3. Materiais, Técnicas e Procedimentos	14
3.1. Materiais de base e revestimentos.....	14
3.1.1. Substratos e Antagonistas.....	14
3.1.2. Revestimentos.....	17
3.1.3. Rugosidades.....	19
3.2. Determinação do Modelo Experimental	20
3.2.1. Mecanismos de Dano	20
3.2.2. Condições de contacto e Modelo de ensaio de abrasão.....	21
3.2.3. Modelo do ensaio de escorregamento	30
4. Apresentação e discussão de resultados	37
4.1. Caracterização de Substratos em Desgaste por Abrasão	37
4.2. Caracterização de Revestimentos em desgaste por Abrasão	43
4.2.1. Substratos vs Revestimentos	47
4.3. Caracterização em ensaios de escorregamento	48
4.4. Análise de fiabilidade	58
5. Conclusão	61
6. Bibliografia.....	62
7. Anexo I.....	64
7.1. Tribómetro para ensaios de desgaste.	64
7.2. Tribómetro para ensaios de escorregamento.....	65
7.3. Microscópios ópticos	66
7.4. Microscópio electrónico de varrimento	67
7.5. Medição de dureza	68
7.6. Medição de rugosidade	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de transmissão de uma bicicleta.	4
Figura 2 – Esquema de uma corrente “sedis” (Suderland, 2005).	4
Figura 3 – Comparação do desgaste produzido por SiO ₂ e SiC, (Rabinowicz, 1995).	7
Figura 4 – Geometria de uma partícula de abrasivo (Trezona, 1999).	7
Figura 5 – Representação esquemática de superfícies, a escala vertical foi largamente aumentada em relação à horizontal (Maradudin, 2007).	9
Figura 6 – Metodologia para selecção de revestimentos em tribologia (Holmberg and Matthews, 1994).	12
Figura 7 – Morfologia granular da Balinit C.	18
Figura 8 – Morfologia granular do protótipo do IPN.	18
Figura 9 – Fotografia do desgaste dos eixos (Figueiredo, 2009).	22
Figura 10 – Esquema da montagem em ensaios de abrasão.	22
Figura 11 – Representação real da montagem em ensaios de abrasão.	23
Figura 12 – Representação da geometria de contacto.	24
Figura 13 – Zona de desgaste dos eixos de prova.	25
Figura 14 – Fotografia e representação da elipse formada pelo desgaste abrasivo num material revestido.	27
Figura 15 – Representação da montagem em escorregamento.	31
Figura 16 – Fotografia da zona de contacto Material B, 2N – 30 minutos.	33
Figura 17 – Representação esquemática da geometria de desgaste to provete móvel.	34
Figura 18 – Representação do volume removido em função da severidade do Material A.	40
Figura 19 - Representação do volume removido em função da severidade do Material B.	42
Figura 20 – Zona de desgaste a dois corpos, 1,5N – 100 ciclos: a) do Material B; b) do Material A.	43
Figura 21 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos revestidos por Balinit C.	45
Figura 22 – Zona de desgaste por abrasão a dois corpos do Material B revestido com Balinit C, 0,2N – 160 ciclos.	45
Figura 23 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos revestidos por CrAlZr(N).	46
Figura 24 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos Delta.	47
Figura 25 – Comparação de k entre materiais.	48
Figura 26 – Representação da força de atrito em função da carga normal aplicada para o Material B.	49

Figura 27 - Representação do volume removido sobre a severidade do Material B (escorregamento.)	49
Figura 28 – Comparação de coeficiente de atrito: (1) – Relativo à lei de Amontons-Coulomb; (2) - Relativo à abordagem energética.....	51
Figura 29 - Fotografia da zona de contacto, Balinit C – 12.10, 2N – 120 minutos.....	52
Figura 30 – Fotografia da zona de desgaste do protótipo do IPN em SEM: a) zona de desgaste; b) periferia da zona de desgaste.	52
Figura 31 – Composição química das placas ilustradas na figura 24.....	53
Figura 32 – Polimento da zona de contacto: a) Balinit C, 2N – 180 minutos; b) protótipo IPN, 2N – 120 minutos.	53
Figura 33 – Zona de desgaste Delta – antagonista, 2N – 60 minutos: a) cratera de desgaste; b) formação de película.	54
Figura 34 - Zona de desgaste do revestimento Delta – antagonista, 2,5N – 60 minutos: a) cratera de desgaste; b) formação de placas.....	55
Figura 35 - Representação da força de atrito sobre a carga aplicada do M2.	55
Figura 36 - Zona de desgaste M2, 2,5N – 60 minutos: a) Zonas de planaltos; b) identificação de partículas de transferência oxidadas cuja aglomeração dá origem à formação de placas.	56
Figura 37 – Zona de desgaste CrAlZr(N), 2N – 120 minutos: a) zona de contacto sem revestimento; b) presença de revestimento proximidade da periferia da zona de contacto.	57
Figura 38 - Representação da força de atrito em função da carga normal aplicada para o CrAlZr(N), segunda aplicação.....	57
Figura 39 – Tribómetro para ensaios abrasivos.....	64
Figura 40 – Montagem para ensaios de escorregamento.....	65
Figura 41 – Microscópio óptico <i>Mitutoyo</i>	66
Figura 42 – Microscópio óptico <i>Nikon</i>	67
Figura 43 – Microscópio electrónico de varrimento.	67
Figura 44 – Durómetro.	68
Figura 45 – Medidor de rugosidade portátil.	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de tratamento térmico e dureza dos substratos.	15
Tabela 2 – Condição de revenido e dureza do M2 e Delta.	16
Tabela 3 – Tratamento térmico e dureza dos antagonistas.	17
Tabela 4 – Revestimentos ensaiados.	17
Tabela 5 – Medições de rugosidade.	20
Tabela 6 – Variáveis do ensaio.	23
Tabela 7 – Variáveis de ensaio WC/C.	24
Tabela 8 – Comparação de granulometrias da Alumina.	28
Tabela 9 – Lubrificantes ensaiados.	28
Tabela 10 – Variáveis de ensaio.	31
Tabela 11 – Dimensões do contacto elástico e pressões de contacto máximas.	32
Tabela 12 – Comparação de durezas.	37
Tabela 13 – Registo de medições e valores calculados para o Material A em desgaste.	39
Tabela 14 - Registo de medições e valores calculados para o Material B em desgaste.	41
Tabela 15 – Comparação da taxa específica de desgaste k entre os materiais A e B.	42
Tabela 16 – Registo de medições e valores calculados para eixos revestidos por Balinit C em desgaste.	44
Tabela 17 - Comparação da taxa específica de desgaste k entre os eixos Delta e os eixos revestidos por CrAlZr(N).	47
Tabela 18 – Parâmetros de escorregamento: (1) – Coeficiente de atrito relativo à lei de Amontons-Coulomb; (2) - Coeficiente de atrito relativo à abordagem energética.	50
Tabela 19 – Análise de fiabilidade em desgaste.	59
Tabela 20 - Análise de fiabilidade em escorregamento.	60

SIMBOLOGIA

- A – Área de secção transversal da calote cilíndrica.
- a – Comprimento total do semieixo horizontal da elipse.
- a_1 – Largura máxima da calote cilíndrica.
- a_S – Comprimento no substrato do semieixo horizontal da elipse.
- b – Comprimento total do semieixo vertical da elipse.
- b_S – Comprimento no substrato do semieixo vertical da elipse.
- c – Comprimento do semi-eixo maior da área elíptica de contacto.
- e – Espessura do revestimento.
- E – Energia gasta por fricção.
- F_a – Força de atrito.
- h_1 – Profundidade da cratera de desgaste calculada por b .
- h_2 – Profundidade da cratera de desgaste calculada por a .
- h – Profundidade da cratera de desgaste.
- H – Dureza do material.
- k – Taxa específica de desgaste.
- k_E – Constante tribológica do aço no modelo de atrito.
- K – Constante tribológica do aço.
- l – Comprimento do eixo.
- n°_{ciclos} – Número de ciclos.
- N – Força normal.
- r – Raio do eixo de prova.
- R – Raio do eixo de contraprova.
- R_a – Rugosidade média.
- R_q – Rugosidade média quadrática.
- R_z – Altura média pico a vale.
- R_k – Rugosidade média do núcleo do perfil.
- R_{pk} – Rugosidade média dos picos que estão acima da área de contacto mínima do perfil.

R_{vk} – Rugosidade média dos vales abaixo da área de contacto mínima do perfil.

S_c – Valores máximos da pressão de contacto.

V – Volume de material removido.

X_0 – Dimensão parcial do raio do eixo.

X – Distância percorrida.

X_{p-p} – Distância pico a pico.

θ – Ângulo de abertura da calote cilíndrica.

μ – Coeficiente de atrito.

μ_E – Coeficiente de atrito no modelo energético.

1. INTRODUÇÃO

A finalidade do trabalho aqui descrito é a elaboração da dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

A presente dissertação teve como objecto o estudo de tratamentos de superfície a aplicar aos eixos de corrente de bicicleta com o intuito de obter maior resistência ao desgaste. Os revestimentos foram aplicados por um processo PVD.

Sendo este trabalho a continuação de um esforço conjunto de longa data entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e a empresa SRAMPort – Transmissões mecânicas Lda., a maioria dos objectivos já foram traçados. As condições de trabalho e de ensaio que conduzem a uma adequada simulação da situação real de trabalho dos componentes foram já estabelecidas em estudos anteriores o que permitiu que a adaptação dos processos de ensaio tivesse sido simples.

A primeira parte do trabalho abordou a caracterização de dois aços que são usados actualmente pela SRAMPort com o intuito de servirem de substratos dos novos revestimentos. O substrato que oferecer maior resistência ao desgaste abrasivo será o escolhido. Na sequência da aplicação de vários revestimentos, considerados adequados e disponíveis para a aplicação em vista, procedeu-se à sua caracterização quanto à resistência ao desgaste e aos seus atributos como lubrificantes.

Este estudo divide-se em cinco capítulos, o primeiro dos quais apresenta o tema e os objectivos do trabalho realizado. O segundo capítulo apresenta um enquadramento do tema e enaltece a relevância da bicicleta na sociedade moderna. São também abordados os princípios físicos aqui aplicados nomeadamente os modelos de desgaste e a relação entre as condições de serviço e de ensaio.

No terceiro capítulo são identificados todos os materiais usados no estudo, são descritos os métodos de ensaio, os métodos de medição e os modelos de tratamento de dados adequados às condições de ensaio em laboratório.

O quarto capítulo destina-se à apresentação de resultados e todas as suas discussões adjacentes. São comparados e classificados todos os componentes e materiais diferentes em questões de resistência ao desgaste e propriedades de autolubrificação.

No capítulo cinco são apresentadas as conclusões delimitantes do presente estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história, como nós a conhecemos, diz-nos que um dos meios de locomoção e objecto de lazer mais importantes dos últimos anos é a bicicleta. A sua forma e constituição nos dias de hoje são fruto da evolução que ocorreu ao longo de vários anos.

Atendendo ao objectivo principal da presente dissertação, é interessante salientar que, só durante a última metade da sua existência é que a bicicleta beneficia da transmissão por corrente. Este tipo de transmissão veio facilitar o deslocamento por parte do utilizador, permitiu a introdução de carretos, os típicos conjuntos de rodas dentadas de diferentes diâmetros, e uma fácil variação da relação de transmissão. A soma dos dois mecanismos mencionados revolucionou a utilização da bicicleta no mundo do desporto e assim permitiu afirmar a total utilidade da sua existência actual.

Para a presente dissertação, é importante saber qual o desgaste em trabalho dos componentes principais da bicicleta e que mecanismos de desgaste estão presentes nos mesmos. Assim será possível aumentar a resistência ao desgaste dos componentes em estudo através da introdução de modificações de superfície que permitam diminuir/atenuar a acção desses mesmos mecanismos. Isto pode ser feito pela aplicação de revestimentos que diminuam o atrito entre os componentes mas também minimizem a acção (por exemplo, dificultando a aglomeração) dos agentes que facilitam o desgaste, os abrasivos.

Este capítulo é dedicado ao tipo de transmissão e correntes usadas em bicicleta bem como aos mecanismos de interacção e desgaste dos seus componentes.

2.1. Correntes e Transmissão

O mecanismo usado na transmissão de movimento na esmagadora maioria das bicicletas é a transmissão por corrente, Figura 1. Este tipo de transmissão assegura um elevado rendimento mesmo quando as rodas dentadas possuem um determinado desalinhamento. É claro que isto implica uma maior folga nas componentes periféricas da corrente mas permite a utilização de carretos e de rodas dentadas que oferecem um elevado número de diferentes relações de transmissão, Figura 1.



Figura 1 – Sistema de transmissão de uma bicicleta.

As correntes de transmissão utilizadas em bicicleta podem ser classificadas em dois tipos: correntes de rolos e correntes tipo “sedis”. No presente estudo interessa-nos apresentar a corrente tipo “sedis” ou sem bucha, Figura 2.

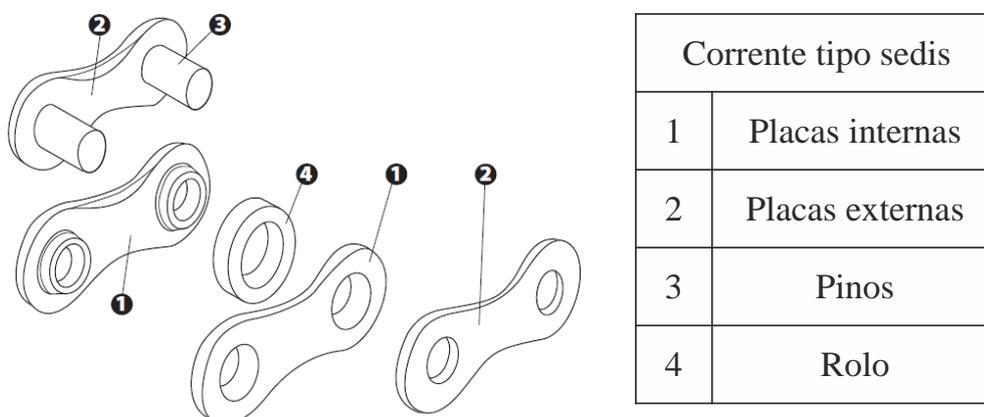


Figura 2 – Esquema de uma corrente “sedis” (Suderland, 2005).

2.2. Modos de Desgaste

Na presente secção vão ser descritos os principais mecanismos de desgaste presentes nas correntes de bicicleta, os quais já foram identificados nos componentes em análise em estudos anteriores. (Julião, 1998; Figueiredo, 2009 e Simões, 2010).

Os mecanismos de falha das transmissões por corrente de rolos de construção clássica são a fadiga das placas de ligação, a fadiga por impacto na ligação rolo – bucha, e a abrasão da bucha, do eixo e do rolo. O desgaste pode ser descrito como a remoção de

material de uma superfície sólida por acção mecânica. Sendo que a quantidade de material removida por instante ou ciclo é pequena (Rabinowicz, 1995).

Actualmente não existe uma total uniformidade no que toca à classificação dos vários tipos de desgaste. Pode dizer-se que existem cinco tipos principais de desgaste: Adesão, Erosão, Abrasão, Corrosão e desgaste por fadiga superficial.

A análise dos mecanismos de desgaste presentes em correntes de bicicleta foi realizado num estudo anterior, (Figueiredo, 2009). Aquele estudo permitiu concluir que o desgaste por Abrasão é predominante no contacto eixo – placa interna.

A abrasão ocorre quando uma superfície dura, ou uma superfície macia com partículas duras na interface, desliza sobre outra superfície mais macia e provoca a remoção de material formando sulcos e originando partículas soltas (Rabinowicz, 1995). A diferença de durezas entre as superfícies em contacto pode não ser muito elevada no caso de se verificar a presença de partículas abrasivas.

Existem dois tipos de desgaste por abrasão, desgaste a dois corpos e desgaste a três corpos. No entanto a classificação dos grupos mencionados não é uniforme em toda a comunidade científica. A distinção entre os dois grupos é feita tomando em conta a morfologia das superfícies de desgaste bem como o movimento relativo das partículas abrasivas que é predominante. O desgaste a dois corpos ocorre quando as partículas abrasivas, com uma dureza superior ao material dos componentes em contacto, penetram na superfície do material macio, onde ficam alojadas temporariamente. O movimento relativo das partículas é de escorregamento dando origem a um desgaste no outro componente cuja superfície revela uma geometria com sulcos estriados com direcção paralela ao movimento. O mecanismo a três corpos ocorre quando as partículas abrasivas estão livres na interface de contacto entre os componentes adaptando a diferença de movimento relativo por rotação livre sobre o seu eixo. O desgaste característico provocado tem uma morfologia de pitting, em que as superfícies apresentam picadas de onde o material foi removido.

A presença de partículas abrasivas foi apresentada e justificada num estudo anterior, (Figueiredo, 2009), e será resumido no capítulo seguinte desta dissertação.

2.2.1. Dureza

A dureza é uma propriedade do material que influencia directamente o desgaste, normalmente é inversamente proporcional ao desgaste. Ou seja, uma maior dureza determina um menor desgaste.

Considerando os aços, existem três parâmetros que controlam a dureza. São eles a % de carbono da matriz, as fases presentes no aço, altamente dependentes dos tratamentos térmicos, e os elementos de liga. A % de carbono presente num aço envolve a porção presente na matriz mas também à porção ligada na forma de carbonetos. A presença do carbono em ambos os casos propicia ao aumento de dureza no material, no entanto, a dureza medida em qualquer localização do material é condicionada pela concentração de carbonetos nessa mesma área. Estes mesmos carbonetos necessitam de temperaturas elevadas para precipitar, logo podem induzir uma diminuição de tenacidade e ductilidade (Zum-Ghar, 1987). Em resumo, recomenda-se uma dissolução dos elementos de liga durante a austenitização de forma a maximizar a dureza da matriz quando a abrasão é produzida por abrasivos de pequena dimensão, as pressões de contacto são baixas e a carga não é aplicada de forma impulsiva.

2.2.2. Agentes Abrasivos

No caso de um agente abrasivo, a relação de durezas da partícula abrasiva em relação ao componente com o qual contacta é a condição determinante na quantidade de dano produzido; quanto maior for esta razão de durezas maior será o desgaste, Figura 3. É possível observar que a origem e a dureza das partículas provocam diferentes condições de desgaste.

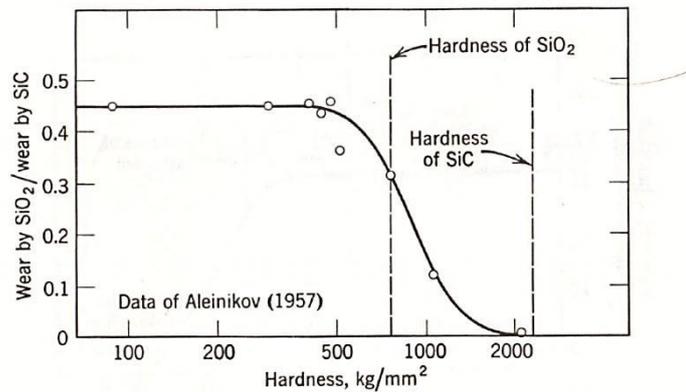


Figura 3 – Comparação do desgaste produzido por SiO₂ e SiC, (Rabinowicz, 1995).

Existe ainda outra condição que interfere na quantidade de desgaste produzido, a geometria das partículas de abrasivo, sendo que existe um diâmetro (D) máximo para o qual a abrasão é mais severa, e conseqüentemente maior quantidade de material removido (Rabinowicz, 1995). A abrasividade induzida pela geometria das partículas abrasivas é outro factor determinante da quantidade de material removido. O ângulo de ataque da partícula abrasiva é uma forma possível de caracterizar esse efeito. O ângulo de ataque, θ , que representa o ângulo entre a superfície de ataque da partícula com a superfície do material, tem um valor mínimo, abaixo do qual não é aplicado dano, em teoria, Figura 4 (Mulhearn e Samuels, 1962).

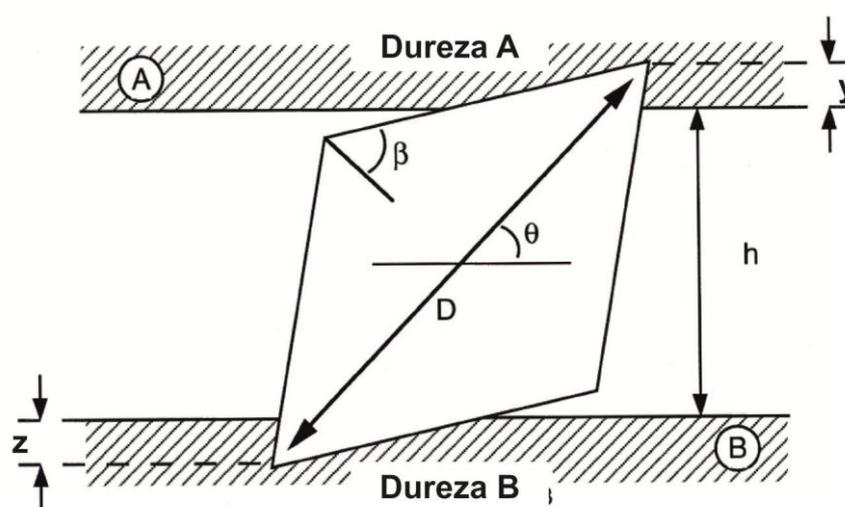


Figura 4 – Geometria de uma partícula de abrasivo (Trezona, 1999).

2.3. Fricção

A definição do fenómeno de atrito ou fricção apresenta-se como a resistência ao deslizamento de um corpo sólido sobre outro, sendo aqui aceite a definição macroscópica de corpo sólido. Um elevado atrito pode ser desejável no caso, por exemplo, de necessidade de aderência (sistema pneu – estrada) ou indesejável como no presente estudo.

Este tipo de fenómeno é responsável por produzir música num instrumento de cordas e arco mas também é responsável por dissipar a energia cinética durante a travagem de veículos de transporte.

Outra condicionante do processo é a presença de “contaminantes” nas superfícies em contacto, que vão alterar as condições de contacto e consequentemente o seu comportamento. Atendendo às contaminações por partículas habitualmente presentes na atmosfera, bem como à formação de óxidos sobre as superfícies metálicas tipicamente usadas em engenharia, as superfícies dos componentes mecânicos estão normalmente contaminadas por películas superficiais. É o mesmo que dizer que as referidas superfícies raramente estão em contacto directo entre si.

Os parâmetros comumente usados para classificar este tipo de fenómeno são a força de atrito, F_a , e o coeficiente de atrito, μ . Este coeficiente expressa a magnitude do atrito entre determinadas superfícies e é um parâmetro adimensional, como se pode verificar pela expressão seguinte (Lei de atrito de Amontons-Coulomb).

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad (1)$$

Sendo N o valor da força normal que aproxima e provoca o contacto entre os dois corpos, que pode resultar do peso de um dos corpos, ou ser uma força aplicada externamente.

Sabendo isto, o coeficiente de atrito não pode ser considerado como uma propriedade intrínseca dos materiais mas sim uma grandeza altamente dependente do material antagonista e das condições de contacto. Embora existam tabelas e publicações que apresentem valores típicos para as constantes de atrito, esses valores são meramente indicativos para comparação porque são respectivos a condições de ensaio específicas. O estudo em questão trata de valores de atrito dinâmico de Coulomb, devido ao sistema adquirir valores de atrito num regime de escorregamento estabilizado, (Bhushan, 2000).

2.3.1. Paliativos

Na actualidade, existem duas classificações para as condicionantes do atrito. São elas, as condicionantes de natureza física e condicionantes de natureza química. A morfologia da superfície dos componentes e a morfologia de contacto são de origem física. A presença de contaminantes, lubrificantes, óxidos e a compatibilidade metalúrgica dos materiais originais classificam-se como paliativos através da natureza química.

A rugosidade é um parâmetro de natureza física presente em qualquer superfície dos materiais, independentemente do processo de fabrico, que pode interferir com a geometria ou afectar as propriedades à escala microscópia, Figura 5. Mesmo os processos de polimento mais avançados não possibilitam a eliminação de irregularidades da ordem de algumas distâncias atómicas (Bhushan, 2000).

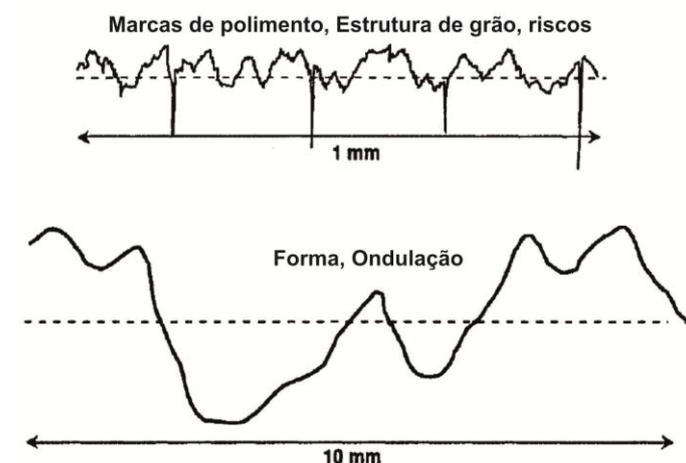


Figura 5 – Representação esquemática de superfícies, a escala vertical foi largamente aumentada em relação à horizontal (Maradudin, 2007).

A rugosidade caracteriza-se por flutuações na superfície com comprimentos de onda curtos, asperezas e vales, com diferentes tamanhos e comprimentos, como se pode observar na Figura 5. Estes são referidos na literatura como asperezas e normalmente resultam do processo de maquinagem ou conformação. A ondulação representa as irregularidades superficiais de maior comprimento. Existem várias dezenas de parâmetros quantitativos da rugosidade, pelo facto de serem mais relevantes ou simplesmente mais usuais seleccionaram-se os seguintes: R_a (rugosidade média aritmética), R_q (rugosidade média quadrática), R_z (altura média pico a vale), R_k (rugosidade média do núcleo do perfil),

R_{pk} (rugosidade média dos picos que estão acima da área de contacto mínima do perfil), R_{vk} (rugosidade média dos vales abaixo da área de contacto mínima do perfil), (Bhushan, 2000).

Como foi mencionando anteriormente, as condicionantes de natureza química podem-se apresentar como a presença de películas superficiais formadas nas superfícies dos componentes a partir dos lubrificantes e seus aditivos, a formação ou introdução de contaminantes e óxidos poderá partir do meio ambiental ou por reacção química com os materiais da superfície e por modificação dos materiais ou propriedades dos mesmos através de tratamentos de superfície.

Como tal, a presença de contaminantes à superfície é um factor condicionante dos processos de fricção, sendo que se verifica na maior parte dos materiais. Podem ser compostos por camadas de óxidos, nitretos, sulfatos, cloretos (que se formam por reacção química), gorduras, óleos, vapor de água, entre outros, sendo estes os mais comuns. O processo de deslizamento, através da energia dissipada por atrito, e dos seus efeitos na temperatura e deformação local afectam de forma significativa o crescimento/destruição das películas de superfície.

A mínima quantidade de agentes contaminantes pode interferir directamente com o fenómeno de fricção ou condicionar reacções químicas. Se os filmes forem removidos durante o processo inicial não provocam efeitos, mas caso se trate de óleos ou gorduras, a sua acção tem consequências significativas no atrito, diminuindo-o por vezes em uma ordem de grandeza (Bhushan, 2000).

Os lubrificantes, sejam fluidos ou sólidos, têm uma influência directa sobre os fenómenos de fricção e desgaste, e podem alterar a natureza da interacção das superfícies. São normalmente aplicados com o objectivo de eliminar ou diminuir o contacto entre componentes, mas podem ser muitas vezes aplicados para dissipação de temperatura. A sua acção pode ser separada em dois tipos, lubrificação por fluido e lubrificação por filme fino. O primeiro ocorre quando um filme fino de líquido ou gás separa completamente dois corpos e o segundo é caracterizado pela presença de um filme sólido entre os corpos em contacto, seja um revestimento ou resultado de uma reacção química dos corpos com o meio envolvente.

A adesão dos revestimentos sólidos é influenciada pela compatibilidade dos materiais de revestimento com o substrato. Este conjunto pode ligar-se quimicamente ou

mecanicamente e as ligações químicas obrigam a uma boa limpeza da superfície do substrato. No caso de um revestimento de MoS_2 , as arestas da geometria cristalina penetram na superfície do substrato e são responsáveis pela adesão (Buckley, 1981).

A compatibilidade química entre o substrato e o revestimento é fundamental para uma boa adesão entre os dois. Em algumas situações em que se verifica um défice de adesão podem ser aplicados processos como polimento, pré-tratamento da superfície e promotores de adesão (Buckley, 1981).

No campo de aplicação em questão, as famílias de revestimentos que se destacam são, os revestimentos macios de estrutura lamelar e os revestimentos duros.

Os revestimentos macios de estrutura lamelar, na generalidade, resistem a cargas normais elevadas ao mesmo tempo que oferecem baixa resistência ao corte entre os planos de ligação, e assim diminuem o atrito. Este grupo engloba o MoS_2 , grafite e seus derivados, HBN, H_3BO_3 , WS_2 , GaSe, GaS, SnSe e NbSe_2 (Holmberg and Matthews, 1994).

Os revestimentos duros provaram ser excelentes contra a resistência à abrasão, em casos quando depositados na forma dum revestimento fino sobre um substrato duro, embora mais macio que o revestimento. O revestimento oferece protecção contra o desgaste de superfícies duras ou partículas. Alguns destes revestimentos são Al_2O_3 , TiN, TiC, que são materiais cerâmicos resistentes a altas temperaturas mas com coeficientes de atrito bastante elevados (Holmberg and Matthews, 1994). Outros revestimentos serão os (Ti,Al)N, BN, CrN, ZrN, CrC, BC, WC, TiB e FeB e combinações possíveis destes mesmos elementos. Um dos actuais objectivos dos investigadores é criar uma combinação que englobe as características principais desejadas.

Devido ao elevado número de revestimentos disponíveis, na determinação do tipo de processos e materiais a aplicar como revestimentos, alguns autores sugerem metodologias de selecção, tal como (Holmberg and Matthews, 1994), Figura 6, ou algoritmos de selecção automáticos como os referidos em (Luo et al, 2009).

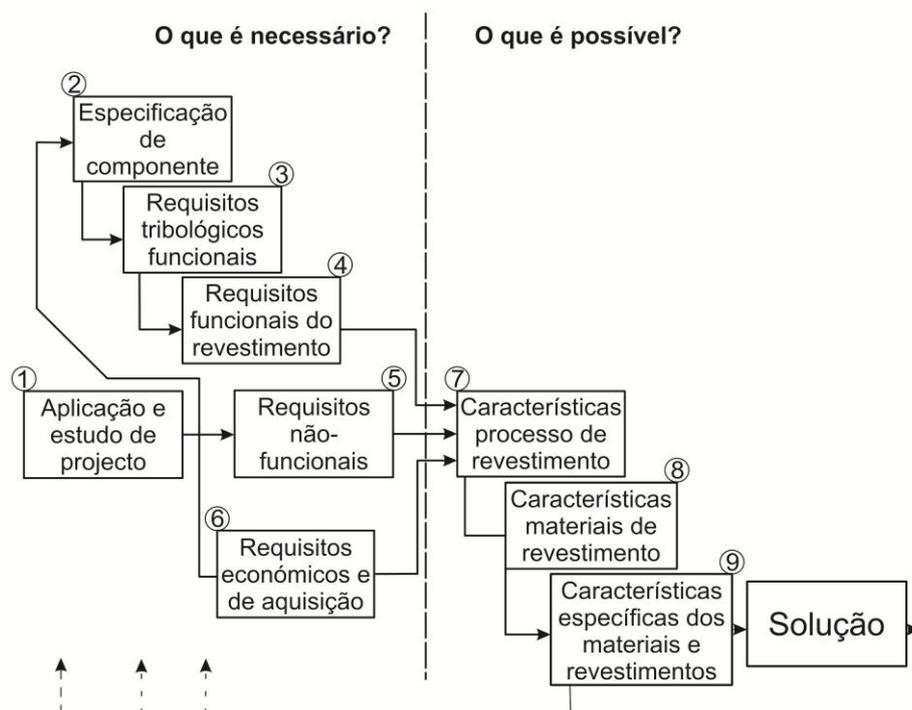


Figura 6 – Metodologia para selecção de revestimentos em tribologia (Holmberg and Matthews, 1994).

Partindo das características dos componentes com melhores propriedades actualmente aplicados, o seguimento lógico será encontrar uma solução que melhore o desempenho dos mesmos componentes, nunca comprometendo as propriedades mecânicas e tribológicas já adquiridas. Assim sendo, a escolha dos processos de tratamento de superfície recorre a um modelo de selecção, apresentado na Figura 6.

A primeira fase diz respeito à iniciação de qualquer projecto, a fase de estudo de desenho e geometrias necessárias. São tomados em consideração os processos tribológicos. A segunda fase engloba a determinação de condições de serviço, tais como forças aplicadas, pressões de contacto, etc. e adiciona-las às condicionantes de aplicação como custos, duração desejada, etc.

A terceira fase permite averiguar as variáveis tribológicas funcionais como a vibração, a fricção, a taxas de desgaste, ruído e tensões aplicadas. De seguida é estudado as condições apresentadas pelas superfícies de deposição, relevantes ao processo de revestimento, sendo elas a dureza, a rugosidade, a tensão de cedência, o módulo de elasticidade, taxas de desgaste e espessura do revestimento.

A fase número cinco engloba os requisitos de processo que não estão associados ao sistema tribológico, tal como dimensões do revestimento, dimensões

máximas admitidas, processos de revestimento ideais, cor e textura do revestimento e isolamento de superfícies do componente. Assim, antes de qualquer escolha deve aplicar-se uma análise de custos específica aos processos, ponto seis.

A sétima fase lida com os aspectos possíveis e limitações das técnicas de revestimento, as quais podem admitir ou eliminar a variedade de materiais seleccionados por incompatibilidade. No seguimento, são analisadas as propriedades e características do material em si, que são independentes do processo de revestimento tal como a dureza de um Nitreto de Titânio que é a mesma seja este aplicado por PVD (Physical vapor deposition) ou CVD (Chemical vapor deposition). Logo para a oitava fase, pode-se recorrer à análise presente em (Ashby, 1999), onde são apresentadas diversas propriedades tal como o modulo de elasticidade, a dureza, a resistência, a condutibilidade térmica, etc.

No final, a nona fase combina os conhecimentos das duas fases anteriores e refina-os, de modo a chegar a soluções concretas.

3. MATERIAIS, TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

O presente capítulo tem como intento a apresentação de todos os materiais, procedimentos e variáveis de decisão. Os processos de determinação das variáveis de ensaio serão brevemente enunciados visto que foram determinados em estudos anteriores já mencionados.

Na elaboração de ensaios tribológicos é deveras essencial a correcta selecção de todos os parâmetros partícipes, visto que todas as conclusões daqui retiradas vão ser directamente deduzidas da comparação dos resultados obtidos.

A introdução do conceito de ambiente controlado, pela realização de ensaios em laboratório, possibilita o controlo das variáveis condicionantes. Isto permite acentuar as diferenças características em estudo dos materiais.

Serão citados os métodos de cálculo, critérios e análises geométricas aplicadas ao presente estudo.

3.1. Materiais de base e revestimentos

Sendo o presente estudo um esforço conjunto entre o Departamento de Engenharia Mecânica e a empresa SRAMPort, a caracterização vai incidir sobre materiais e processos proveitosos para as duas instituições, sendo que na decisão de aplicação de novos revestimentos vai pesar a comparação com um componente final, com tratamento de superfície, usado actualmente nos eixos das correntes SRAM. Trata-se de um revestimento de carboneto de crómio, cuja designação comercial SRAM é Delta, e que foi anteriormente caracterizado (Simões, 2010).

3.1.1. Substratos e Antagonistas

Inicialmente foi necessário estabelecer uma estratégia que possibilitasse o revestimento dos eixos recorrendo à técnica de deposição PVD. Atendendo à geometria dos eixos, a forma mais adequada foi utilizar eixos tubulares que são utilizados pela SRAMPort em alguns dos seus produtos. Esta opção revelou-se simples e eficaz atendendo

à limitação de tempo mas tem como limitação principal o facto de os eixos disponíveis serem fabricados em aço C68 cuja resistência ao revenido é muito limitada. A SRAMPort disponibilizou dois eixos diferentes, denominados para este efeito de Material A e Material B. Ambos são aço ao carbono C68 (0,68% de carbono), com diferenças nas propriedades mecânicas devido a diferentes rotinas de tratamento térmico. Pode-se dizer que as propriedades mecânicas de interesse são a elevada dureza superficial, a resistência ao desgaste abrasivo e resistência à tracção. (Callister, 2007).

A Tabela 1 resume as propriedades e as condições de tratamento térmico para cada material, as quais são condições a ter em conta na selecção dos revestimentos.

Tabela 1 – Condições de tratamento térmico e dureza dos substratos.

Designação	Tratamento	Dureza média (HV10)
Material A	Tratamento em banho de óleo e Revenido a 200°C	455± 20
Material B	Tratamento em banho polimérico e Revenido a 230°C	694± 32

Como foi mencionado no parágrafo anterior, as condições dos tratamentos térmicos são imposições na escolha dos revestimentos. Isto porque a temperatura de deposição do revestimento não pode, ou não deve superar a temperatura de revenido. As conclusões parciais da análise dos substratos apresentados pela SRAMPort e posterior estudo dos revestimentos aplicados levantaram certas questões, que obrigaram a uma pequena reformulação dos materiais em estudo.

Pelo facto de se tratar de substratos com temperaturas de revenido muito baixas, da ordem dos 230°C, a temperatura de deposição dos revestimentos não poderia ultrapassar esse valor (Chandler, 1995). Tomando esta condição, foi escolhido para substrato um material alternativo anteriormente caracterizado (Simões, 2010), o aço rápido AISI M2. O aço AISI M2 é um aço rápido com aproximadamente 0,95% de carbono homogeneamente distribuído ligado com Molibdénio-Tungsténio. Embora seja maioritariamente um aço usado em ferramentas de trabalho a quente, o M2, também começa a introduzir-se, em aplicações de trabalho a frio devido à combinação de propriedades mecânicas como a resistência ao desgaste, a tenacidade e a resistência à

compressão. Todavia a principal razão pela qual o M2 foi considerado no presente estudo é a sua dureza, Tabela 2, bastante mais elevada que os substratos anteriores, e a resistência ao revenido até cerca de 500°C.

Como referido, no que toca a revestimentos, a comparação com a realidade actual é em contraste com os componentes Delta. Trata-se de aço ao carbono C65 (0,65% de carbono) com tratamento superficial de cromização.

O processo consiste na colocação do substrato numa atmosfera de crómio, que com a elevação da temperatura permite a formação de carbonetos de crómio à superfície do componente, por reacção do carbono presente. A dureza superficial aumenta, Tabela 2, assim como a resistência ao desgaste. Trata-se de um processo moroso, que devido ao aumento de temperatura pode aumentar o tamanho de grão e assim condicionar as propriedades mecânicas.

Tabela 2 – Condição de revenido e dureza do M2 e Delta.

Designação	Temperatura de Revenido (°C)	Dureza média (HV)
M2	540° - 595°	863± 18
Delta	200° - 230°	~1200

Durante os ensaios de desgaste e escorregamento foram empregados materiais antagonistas, tais que facilitassem os ditos processos de caracterização. Na caracterização à abrasão aplicou-se um aço ao carbono CK45, 0,45% de carbono macio, com moderada dureza e boa resistência ao desgaste, normalmente aplicado em situações de elevadas velocidades e com necessidade de resistência ao desgaste.

Para os ensaios de escorregamento alternativo, o antagonista seleccionado foi o 12.10, que não é mais do que um aço ao carbono com um teor entre 0,42 – 0,5%. O mesmo possui uma dureza moderada, e uma resistência ao desgaste baixa.

Ambos os materiais apresentam durezas consideráveis, Tabela 3, as quais tem origem no material e respectivo tratamento térmico aplicado.

Tabela 3 – Tratamento térmico e dureza dos antagonistas.

Designação	Tratamento térmico	Dureza média (HV)
CK45	Normalizado	207
12.10	Temperado e revenido	426± 9

3.1.2. Revestimentos

Na escolha dos revestimentos, seguiu-se o método apresentado no capítulo 2. Um dos factores primários foi a compatibilidade das propriedades do substrato e do revestimento, que se verificou ser adequada. Obviamente o factor determinante foi o conjunto de propriedades mecânicas do próprio revestimento, que serão abordadas no capítulo seguinte. Todavia, e como já foi anteriormente referido, a maior limitação na escolha dos revestimentos são as propriedades do substrato, em particular a sua baixa resistência ao revenido que limita a escolha a revestimentos depositados a baixa temperatura. A possibilidade de suprimir ou diminuir o uso de lubrificantes líquidos é um dos objectivos que os fabricantes de correntes perseguem. Neste enquadramento, e de acordo com as limitações de disponibilidade, seleccionaram-se três revestimentos, dois do tipo WC/C, que são revestimentos com dureza reduzida e boas propriedades de deslizamento, e um terceiro revestimento, CrAlZr(N), mais duro mas que se espera ser mais resistente ao desgaste, particularmente ao desgaste abrasivo. No revestimento duro utilizou-se como substrato o aço AISI M2 para garantir adequada dureza do substrato. Os revestimentos propostos para ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Revestimentos ensaiados.

Designação	Balinit C	Protótipo IPN	Protótipo IPN
Família/Tipo	WC/C	WC/C	CrAlZr(N)
Espessura (µm)	3	3	2

Dos revestimentos apresentados o primeiro, a Balinit C é uma designação comercial da Oerlikon Balzers de um Carboneto de Tungsténio com aglomerados

granulares de grafite, WC/C (a-C:H:W), Figura 7. Este tipo de revestimento é bastante usado em aplicações que requerem baixo coeficiente de atrito e boas propriedades de lubrificação.

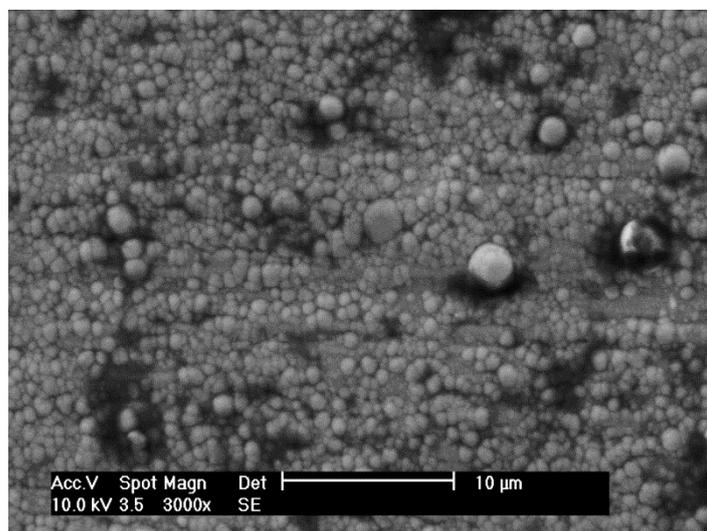


Figura 7 – Morfologia granular da Balinit C.

O protótipo IPN é, como a designação o indica, um projecto em desenvolvimento do Instituto Pedro Nunes. Este revestimento é da mesma família que o anterior, WC/C, e o principal vector do seu desenvolvimento é diminuir o coeficiente de atrito. Apresenta uma morfologia granular, Figura 8, tal como o anterior, daí se esperar um comportamento ao desgaste similar.

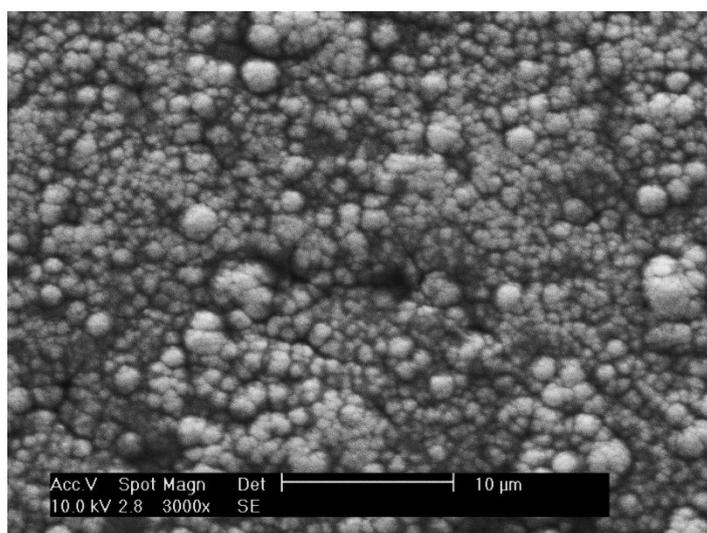


Figura 8 – Morfologia granular do protótipo do IPN.

O terceiro revestimento seleccionado foi também um protótipo recente do IPN, que se apresenta como CrAlZr(N), Crómio – alumínio – zircónio dopado com azoto. Trata-se de um revestimento duro com boas potencialidades no campo da resistência à abrasão que está em fase inicial de desenvolvimento.

Por se tratar de um projecto em desenvolvimento, as condições do processo de deposição ainda não estão optimizadas e em consequência a adesão do substrato não foi a desejável na primeira tentativa de revestimento. Na segunda tentativa de aplicação do revestimento verificou-se uma melhoria significativa na adesão do referido revestimento ao substrato.

O facto de supostamente a temperatura de deposição do revestimento à base de CrAlZr(N) não superar a temperatura de revenido do substrato B, 230°C, possibilitou a deposição desse mesmo revestimento no substrato B.

Todos os revestimentos aqui apresentados serão detalhadamente classificados no capítulo seguinte.

3.1.3. Rugosidades

A rugosidade, um estado de superfície que representa as variações de relevo, pode representar um papel determinante nos ensaios de escorregamento, mas não tanto nos ensaios abrasivos. Isto porque a dimensão das partículas abrasivas é em larga escala superior à dimensão máxima dos relevos ou sulcos de qualquer superfície aqui considerada.

As medições de rugosidade foram efectuadas num rugosímetro Mitutoyo Surftest 500 e os parâmetros de rugosidade mais relevantes estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Medições de rugosidade.

Designação	Parâmetros de rugosidade					
	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
Material B	0,2981	0,3932	2,3582	0,8391	0,2832	0,6300
Balinit C	0,2965	0,3862	2,3209	0,8669	0,2475	0,4995
WC/C IPN	0,3473	0,4326	2,1005	1,0252	0,3311	0,3374
Delta	0,2784	0,3543	1,9804	0,8548	0,1199	0,5349
M2	0,2355	0,3144	1,7693	0,7278	0,2618	0,5880
CrAlZr(N)	0,3274	0,4390	2,7856	0,8592	0,3224	0,7914

3.2. Determinação do Modelo Experimental

A caracterização dos processos de desgaste tipicamente presentes nas correntes de bicicleta teve início na análise de 3 tipos de correntes de bicicletas de estrada cedidas pela SramPort, Lda. O estudo incidiu em componentes diferentes para verificar se os mecanismos e as zonas características de desgaste seriam os mesmos independentemente das condições. Todas as correntes aqui apresentadas foram retiradas de serviço por não cumprirem os requisitos exigidos. Todas elas apresentavam alongamento excessivo. (Figueiredo, 2009).

3.2.1. Mecanismos de Dano

As observações em microscópio óptico de todos os componentes permitiram avaliar os mecanismos de desgaste que apresentam as zonas de contacto entre os vários componentes. Na totalidade dos casos, as zonas em análise apresentavam sulcos de relevo estriados na direcção do movimento. E sendo este um claro indicador de desgaste por abrasão é possível afirmar que se trata do mecanismo de desgaste dominante (Ramalho, 1994).

A proximidade dos componentes reitera a opção de desgaste abrasivo pois ambos apresentam zonas de desgaste características e as suas propriedades mecânicas

relevantes, como a dureza, são muito semelhantes. Em soma, indica a presença de partículas abrasivas (Figueiredo, 2009).

A diversidade de ambientes externos em que as correntes são aplicadas tornam propícia a aglomeração nas zonas de contacto de partículas de poeira, terra, lama, etc. por acção do lubrificante. Derivado do desgaste aplicado, adicionam-se partículas metálicas de ambas as superfícies em contacto e a substância que funciona como agente aglomerante é o fluido de lubrificação. Este comportamento é indesejável neste tipo de aplicações, mas face à necessidade de controlar o coeficiente de atrito entre os componentes é imprescindível utilizar lubrificante.

No processo de determinação do tipo de partículas presentes nas zonas de contacto foram analisadas 10 correntes de competição, englobando todos os ambientes em que estas são aplicadas. O procedimento resumiu-se a:

- Limpeza das correntes por ultra-sons em banho de isopropanol;
- Filtragem da solução obtida em peneiros sucessivamente mais finos para diferenciação da granulometria das partículas;
- As partículas retidas nos peneiros foram observadas por microscopia óptica e electrónica de varrimento;

Conclui-se que as partículas têm geometria angular, com dimensão típica de 150 μm . A sua composição ia desde partículas metálicas provenientes dos componentes, até partículas de carbonato de cálcio e sílica provenientes do meio ambiente. Daí a presença de micro-abrasão nas zonas de contacto (Figueiredo, 2009).

3.2.2. Condições de contacto e Modelo de ensaio de abrasão

Nas zonas de contacto dos diversos componentes da corrente de transmissão de movimento foram detectadas partículas abrasivas provenientes do meio envolvente e da própria corrente. A sua identificação, como já foi referido, permitiu a transposição para ensaios laboratoriais, sendo que a sílica e o carbonato de cálcio foram identificados em maior quantidade que os restantes.

O método de ensaio e suas variáveis foram estudados e referidos num estudo anterior, (Simões, 2010) e serão apresentados de seguida. No decorrer dos ensaios surgiu a necessidade de introduzir ligeiras modificações em alguns processos por conveniência do estudo, e as mesmas serão devidamente descritas na secção subsequente.

3.2.2.1. Caracterização do material de substrato

O contacto entre o eixo e as placas internas, são a principal causa do desgaste por abrasão da corrente, Figura 9. Por essa razão realizaram-se ensaios de abrasão onde o eixo da corrente se mantém estacionário contra um veio rotativo de contra prova, com geometria de contacto de cilindros cruzados, Figura 10 e Figura 11.

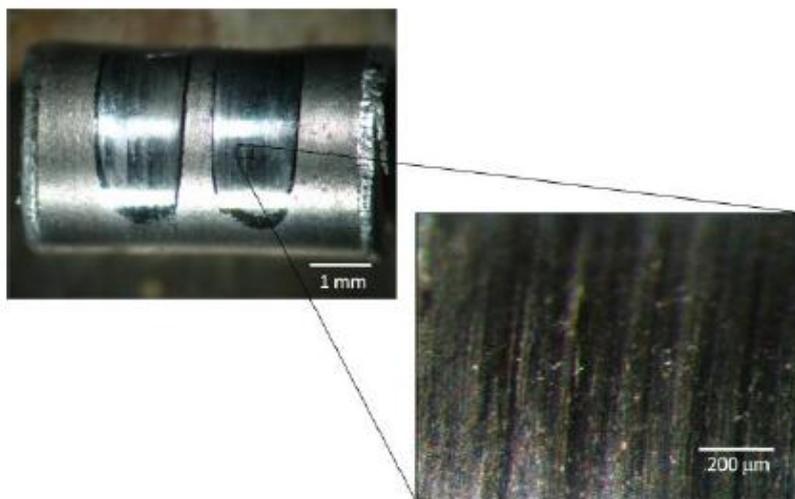


Figura 9 – Fotografia do desgaste dos eixos (Figueiredo, 2009).

Utiliza-se assim um veio de maiores dimensões, cuja superfície desliza sobre as amostras de geometria também cilíndrica, mas com diâmetros inferiores. O veio de maiores dimensões tem um raio médio de 4,96 mm em contacto com o material do eixo de prova que possui em raio médio de 1,8 mm.

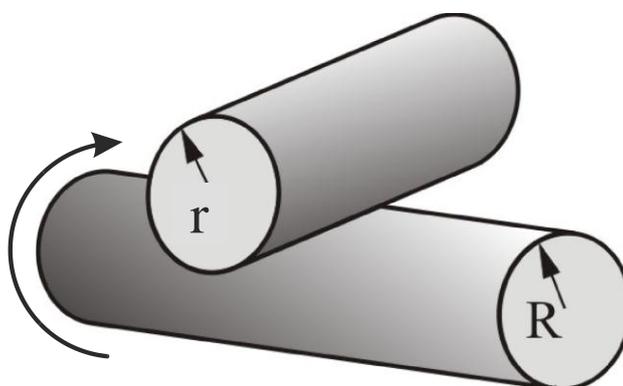


Figura 10 – Esquema da montagem em ensaios de abrasão.



Figura 11 – Representação real da montagem em ensaios de abrasão.

As variáveis de ensaio que visam a simulação das condições de serviço foram determinadas por transposição das condições de funcionamento. Essas mesmas variáveis, Tabela 6, são a carga aplicada, o número de ciclos, a velocidade de rotação do eixo de contra prova e a composição do agente abrasivo, que posteriormente será abordada com mais detalhe.

Importa salientar que a velocidade de rotação do eixo de contra prova, de 50 rpm, é ligeiramente superior à velocidade média em condições reais, e não sofre variação ao longo de todos os ensaios pelo facto de não se tratar de um parâmetro que afecte a resposta do material de uma forma imediata, tal como a carga ou o número de ciclos.

Tabela 6 – Variáveis do ensaio.

Carga (N)	1,5	2	2,5	3	
Nº de ciclos	100	200	400	600	800

Foi necessário realizar 5 ensaios para cada carga aplicada, perfazendo um total de 20 ensaios para cada material.

No caso dos revestimentos do tipo WC/C, as variáveis de ensaio sofreram alterações no número de ciclos e carga aplicada porque, como se poderá ver no capítulo seguinte, a resistência ao desgaste dos mesmos é consideravelmente inferior à do substrato.

Esta modificação vem da dificuldade de caracterizar os revestimentos WC/C, pelo facto de a diferenciação dos parâmetros de desgaste (tamanho das elipses) ser quase impossível por microscopia óptica.

Para obter os novos valores considera-se a altura de desgaste h num intervalo entre 4 e 10 μm , referente à Figura 12. Foi seleccionado este intervalo porque a espessura do revestimento é da ordem dos 3 μm e a altura h tem que ser da mesma ordem de grandeza mas suficiente para chegar ao substrato.

Assim, arbitrando uma taxa específica de desgaste de 1×10^{-3} ($\text{mm}^3/\text{N.m}$), da ordem de grandeza do substrato, e um intervalo de valores de carga entre 0,1 e 0,5 N foi determinado os seguintes parâmetros de ensaio, Tabela 7.

Tabela 7 – Variáveis de ensaio WC/C.

Carga (N)	0,2							
Nº de ciclos	10	20	30	40	70	100	130	160

Após cada ensaio as zonas de desgaste de cada provete são observadas por microscopia óptica. Sabe-se, por se tratar de dois corpos cilíndricos em contacto cruzado, Figura 12, que a remoção de material vai introduzir uma zona de desgaste com forma elíptica, Figura 13. Por conseguinte os parâmetros que vão ser medidos são o comprimento e altura dos respectivos semieixos a e b .

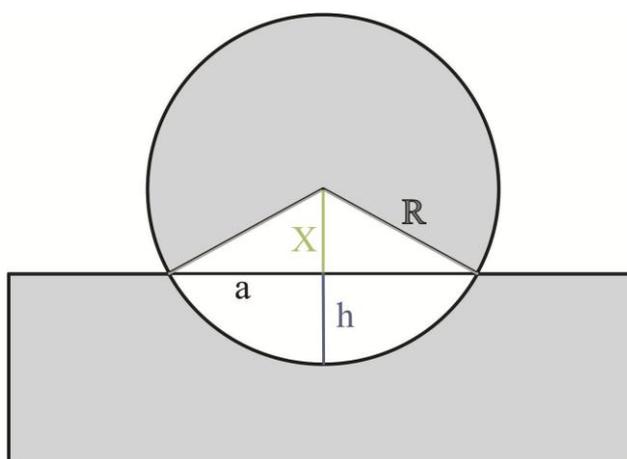


Figura 12 – Representação da geometria de contacto.

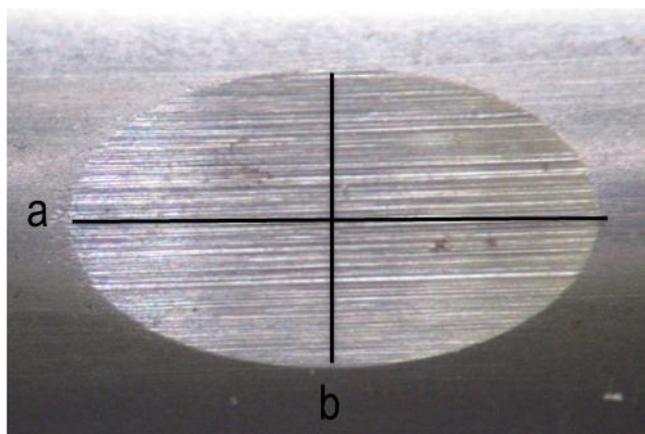


Figura 13 – Zona de desgaste dos eixos de prova.

Através da representação da geometria de contacto e da equação do Teorema de Pitágoras retira-se que:

$$R = h_1 + X_0 \quad (2)$$

$$R = h_2 + X_0 \quad (3)$$

$$h_1 = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (4)$$

$$h_2 = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad (5)$$

Em que h_1 , e h_2 , representam uma altura da cratera de desgaste no eixo de prova, r e R os respectivos raios do eixo de prova e do veio com rotação.

A equação do volume de material removido é (Ramalho e Miranda, 2005):

$$V = \pi \times h^2 \times \sqrt{r \times R} \quad (6)$$

Em que h é a média de h_1 e h_2 .

O parâmetro que permite relacionar os vários materiais é o declive da recta de regressão linear, que vem da correlação do volume de material retirado à amostra e da severidade do ensaio (Carga aplicada multiplicado pela distância percorrida pelo cilindro com rotação).

A equação linear de desgaste de Archard-Czichos, equação (7), permite-nos determinar analiticamente a relação entre o volume de material removido e a severidade do ensaio (produto $N \times X$), a taxa específica de desgaste k . Este tipo de análise é fundamental para determinar as condições de ensaio mais adequadas a cada conjunto de materiais e permite comparar, a resistência ao desgaste de cada material considerado (Czichos, 1992).

$$V = \frac{K}{H} \times N \cdot X = k \times N \cdot X \quad (7)$$

Recorrendo à análise descrita, a determinação da taxa específica de desgaste vai ser feita atendendo à relação linear estabelecida pela equação (7). Os pontos de ensaio são representados num plano onde a severidade corresponde às abcissas e o volume removido às ordenadas. A aproximação linear, por mínimos quadrados, permite eliminar os erros sistemáticos, que estão comumente associados aos erros de calibração, e os erros aleatórios, que podem surgir do método de leitura de resultados ou ainda de vibrações do equipamento.

3.2.2.2. Caracterização de materiais revestidos

Os ensaios de desgaste de revestimentos finos são complexos, particularmente quando o revestimento está aplicado em corpos com contacto pontual como é o caso do presente estudo. A complexidade do estudo está associada ao facto do desgaste produzir a remoção total do revestimento na área de contacto submetida a maiores esforços normais. Por esse motivo o contacto é híbrido envolvendo áreas revestidas e outras não revestidas. Pelo exposto é necessário introduzir algumas modificações ao procedimento de medição das crateras de desgaste que já foi anteriormente descrito.

A principal modificação diz respeito à necessidade de medição de mais dois valores característicos da elipse, como se pode observar na Figura 14. De facto, neste caso a cratera apresenta a forma de um olho, correspondendo a elipse central ao substrato, enquanto que a elipse periférica corresponde à capa do revestimento.

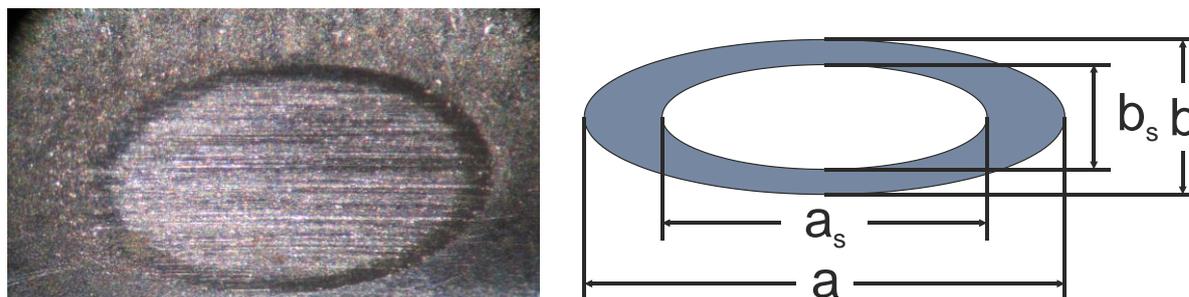


Figura 14 – Fotografia e representação da elipse formada pelo desgaste abrasivo num material revestido.

Sendo a e b as dimensões que caracterizam a elipse total formada pelo revestimento, a_s e b_s as mesmas dimensões em relação ao substrato (material de base). A sua comparação é feita como nos ensaios anteriores, considerando o volume total de material removido (do revestimento e do substrato) e com a severidade dos ensaios.

No cálculo das alturas de desgaste h recorre-se às equações (4) e (5) e a diferença entre a altura total e a altura relativa ao substrato corresponde à espessura do revestimento, e . O volume total de material removido é calculado pela equação (6) e corresponde á soma do volume removido do revestimento e do substrato.

A análise e comparação de resistência ao desgaste é aplicada da mesma forma que já foi anteriormente descrita para a caracterização dos substratos.

3.2.2.3. Lubrificante e Material Abrasivo

A função do material abrasivo no presente estudo é aplicar desgaste no provete da forma mais uniforme possível. A selecção preliminar do agente abrasivo teve início na peritagem das correntes de bicicleta aplicadas em serviço e foi concluído que o abrasivo mais indicado seria a sílica, SiO_2 , para garantir uma réplica tão fiel quanto possível das condições de serviço (Figueiredo, 2009).

No estudo precedente realizado por Simões (Simões, 2010), foi necessário caracterizar eixos revestidos com carboneto de crómio. Atendendo a que o volume de material removido por desgaste é fortemente dependente da relação entre a dureza do material e a dureza da partícula abrasiva, tal como foi apresentado no capítulo de revisão bibliográfica, foi necessário considerar abrasivos mais duros. Assim, analisou-se a influência de três materiais abrasivos: a sílica (SiO_2), o carboneto de silício (SiC) e a alumina (Al_2O_3). Com a aplicação da sílica como abrasivo verificou-se que não era possível produzir desgaste significativo em todos os materiais. Por sua vez o carboneto de

silício produziu desgaste elevado em todos os eixos, o que dificultou a discriminação da resistência ao desgaste dos diferentes materiais. Finalmente o agente seleccionado foi a alumina AC 45 com uma granulometria entre 45 – 70 μm que se mostrou eficiente para produzir desgaste diferenciável nos vários tipos de eixo.

O presente estudo, devido ao facto de incluir revestimentos finos, obrigou a uma ligeira modificação na granulometria do material abrasivo com o objectivo de produzir um desgaste uniforme e crateras elípticas bem definidas. A Alumina seleccionada, P2000, possui uma granulometria inferior à AC 45 usada no estudo anterior, Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação de granulometrias da Alumina.

Abrasivo	Alumina AC 45	Alumina P2000
Granulometria (μm)	45 – 70	10

A presença de lubrificante nas correntes de bicicleta torna-se indispensável com os materiais actualmente utilizados, porque a sua função principal é diminuir a interacção entre as superfícies dos componentes reduzir o atrito e minimizar a corrosão. Contudo, como já foi referido, o lubrificante é responsável pela aglomeração de contaminantes e formando uma pasta que se mantém nas zonas de contacto onde produz um efeito indesejável.

Neste estudo o lubrificante vai desempenhar a função de aglomerante do material abrasivo.

A escolha do lubrificante foi feita no estudo anterior, (Figueiredo, 2009), onde se compararam 3 tipos de lubrificantes de marcas diferentes, Tabela 9.

Tabela 9 – Lubrificantes ensaiados.

Lubrificantes		
<i>SAE 80w-90</i>	<i>FINISH LINETM</i>	<i>Gleitmo FUCHS</i>

A conclusão retirada foi que o lubrificante a ser usado deveria ser o Finish Line por permitir uma abrasão menos dependente da severidade de contacto e também por ser recorrentemente usado por ciclistas.

As proporções da pasta abrasiva foram já estudadas em trabalho anterior, (Simões, 2010), revelando-se que uma mistura homogénea de 3 ml de óleo lubrificante e 4g de alumina é eficiente como agente abrasivo.

3.2.2.4. Procedimento do ensaio de abrasão

Para uma correcta caracterização e classificação de todos os materiais a ensaiar o procedimento deverá ser semelhante em todos os ensaios que de preferência se devem realizar num período curto.

Antes de qualquer ensaio é necessário verificar o funcionamento do equipamento. O tribómetro alternativo utilizado é apresentado no Anexo I. Previamente ao início do estudo o sistema de medição e aquisição dos valores da força de atrito foi cuidadosamente calibrado.

O protocolo experimental seguido no presente estudo implicava a realização sequencial das seguintes tarefas:

- Preparação do suporte e colagem dos eixos orientados na respectiva sequência de ensaio.
- Selecção da frequência de rotação do veio de accionamento, 12 rad/s, o que corresponde a 50 rpm.
- Limpeza com solução de álcool etílico dos eixos a ensaiar e do veio de contra prova e colocação do provete no tribómetro tendo em atenção da posição de contacto com o eixo de contra prova.
 - Aplicação da pasta abrasiva na superfície de contacto do eixo de prova.
 - Aplicação das massas específicas, que controlam a carga aplicada.
 - Inicialização do ensaio com duração determinada. Após o mesmo o provete é limpo para retirar a pasta abrasiva.
- No fim de cada ensaio são medidas as dimensões características da zona de contacto elíptica por recurso a microscópio óptico, Nikon Stereo Photo SMZ e Mitutoyo Toolmaker's Microscope. A observação de todos os pormenores e características da zona de desgaste é essencial para a percepção do mecanismo de desgaste.

- Registo dos valores obtidos e introdução dos mesmos em folha de cálculo para posterior análise.
- Cálculo do volume de material removido e determinação da taxa específica de desgaste.

3.2.3. Modelo do ensaio de escorregamento

O ensaio de escorregamento, cujo modelo será aqui apresentado, foi utilizado no presente estudo para complementar a caracterização os revestimentos WC/C, por se tratar de revestimentos pouco duros mas com razoáveis propriedades lubrificantes. Os revestimentos serão comparados com o material do substrato em termos de coeficiente de atrito.

A Tabela 10 resume os vários pares de materiais e as condições de ensaio testadas para cada par. A inclusão de pares próprios revestimento/revestimento, foi testada com o objectivo de obter informação que possa ser relevante, embora esta solução não seja actualmente utilizada.

As condições e o procedimento de ensaio foram determinadas no estudo anterior, (Figueiredo, 2009), mas como o objectivo desta aplicação não é avaliar a resistência à abrasão, não será aplicado qualquer agente abrasivo. Igualmente não será adicionado qualquer lubrificante pois o objectivo é adquirir informação em condições mais extremas de contacto seco. Assim, foi necessário adaptar as variáveis de ensaio no estudo de eixos revestidos contra eixos revestidos pelo mesmo motivo já explicitado quanto aos ensaios de abrasão. As condições de ensaio aplicadas nas amostras são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Variáveis de ensaio.

Pares de materiais testados			
[tipo 1] Revestimento contra antagonista: M2; C68; Balinit C; WC/C IPN; Delta;		[tipo 2] Revestimentos contra revestimentos: Balinit C; WC/C IPN;	
Carga aplicada (N)	Tempo de ensaio (min)	Carga aplicada (N)	Tempo de ensaio (min)
1,5	60	2	60
2	30	2	120
2	60	2	180
2	120	3	120
2,5	60	4	120

Para realizar este tipo de ensaios de escorregamento foi utilizada a técnica de deslizamento alternativo com geometria de contacto de cilindros cruzados, Figura 15.

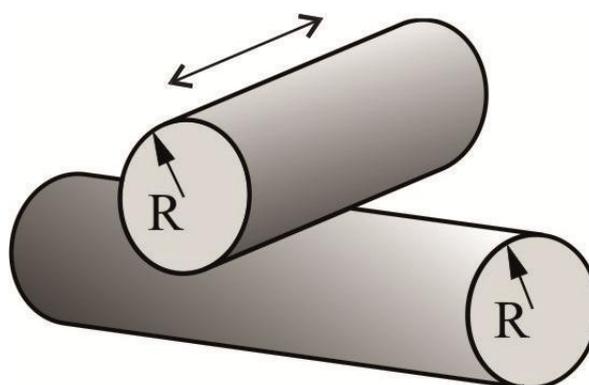


Figura 15 – Representação da montagem em escorregamento.

A selecção desta técnica baseou-se essencialmente no facto do movimento relativo ser bastante similar ao que ocorre no contacto placa interna / eixo durante o funcionamento normal de uma corrente. Este assunto foi profundamente discutido numa dissertação anterior (Figueiredo, 2009). Na Tabela 11 são apresentados os valores máximos da pressão de contacto nos diferentes pares testados, bem como o semi-eixo maior da área elíptica de contacto.

Tabela 11 – Dimensões do contacto elástico e pressões de contacto máximas.

Tipo		Carga normal (não considerado o efeito dos revestimentos)				
		1,5	2	2,5	3	4
1	c (mm)	1,45E-02	1,67E-02	1,87E-02		
	S_c (N/mm ²)	9,91E+01	1,14E+02	1,28E+02		
2	c (mm)		5,62E-03		6,88E-03	7,94E-03
	S_c (N/mm ²)		1,70E+02		2,08E+02	2,40E+02

O tribómetro usado para a realização destes ensaios encontra-se descrito no Anexo 7.2, Figura 40.

Através deste ensaio é possível determinar o coeficiente de atrito e também é avaliar o desgaste dos vários tipos de materiais a ensaiar através da medição da cratera de desgaste.

Os ensaios de escorregamento permitiram a aplicação de uma abordagem energética, a qual tem o objectivo de quantificar a energia dissipada pelo atrito entre superfícies e usar a relação entre a energia e o desgaste como parâmetro discriminador do comportamento dos materiais.

3.2.3.1. Determinação do coeficiente de atrito e volume removido

O principal objectivo da aplicação deste ensaio no âmbito de presente trabalho, visou essencialmente a determinação de coeficientes de atrito entre os vários pares de materiais submetidos a teste. Contudo, complementarmente avaliou-se a quantidade de material removido durante os testes por forma a caracterizar também o comportamento ao desgaste. Assim, a sua quantificação vai ser determinada pelo método posteriormente descrito.

A força de atrito é adquirida e calculada pelo programa de computador, que para o efeito foi realizado em *LabView*. No estudo presente, a força de atrito foi adquirida

de 60 em 60 segundos considerando-se que a média quadrática da força é representativa do período entre aquisições consecutivas. A taxa de aquisição de dados é muito superior à frequência do ensaio, permitindo calcular a força de forma bastante precisa.

A lei de Amontons-Coulomb estabelece que a força de atrito varia de forma linear proporcionalmente à força normal aplicada, definindo-se o coeficiente de atrito como a razão entre a força de atrito, F_a , e a força normal, N .

Para que se possa analisar o princípio utilizado para quantificar o material removido por desgaste, é necessário compreender o tipo de movimento relativo e a geometria de contacto. O estudo presente tem como principais limitações o facto de se pretender utilizar os componentes como provetes. A razão desta limitação ocorre devido à necessidade de efectuar estudos de comparação face à concorrência, estudos do tipo *Benchmarking*. A posição relativa dos provetes foi tal que um deles permanecia alinhado na direcção do movimento, logo o contacto fazia-se segundo uma geratriz de comprimento igual à amplitude pico-a-pico do deslocamento. O contra corpo, com igual geometria permanecia estacionário ao longo do tempo. Pelo motivo exposto resulta clara a razão da geometria de desgaste típica. Figura 16. A medição da geometria correcta dos provetes, e o cálculo exacto do volume removido é um processo bastante complexo e envolve equipamento não disponível. Para efeitos de avaliação relativa, considerou-se uma geometria de contacto mais simples, admitindo-se que a geometria da porção de material removido do provete móvel se aproxima a uma calote cilíndrica obtida por seccionamento de um plano paralelo ao eixo, Figura 17.



Figura 16 – Fotografia da zona de contacto Material B, 2N – 30 minutos.

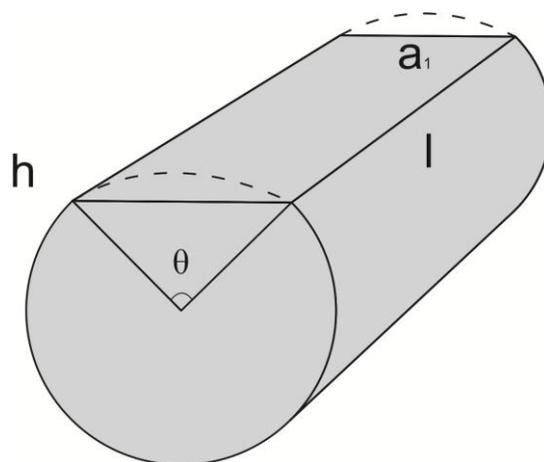


Figura 17 – Representação esquemática da geometria de desgaste to provete móvel.

Após o ensaio, o valor médio da largura da calote, a_1 , é medido por microscopia óptica. Sendo que h representa a altura de desgaste, l o comprimento do eixo de prova, a_1 a largura máxima da calote cilíndrica e θ o ângulo de abertura da calote. No cálculo do volume removido é necessário determinar h , que depende directamente do raio do eixo e da largura máxima da calote, equação (8).

$$h = R - \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{2}\right)^2} \quad (8)$$

No entanto, só é possível determinar o volume removido sabendo θ , que depende do raio do eixo de prova e da altura de desgaste, equação (9).

$$\theta = 2 \times \left(\cos^{-1} \left(\frac{R-h}{h} \right) \right) \quad (9)$$

O respectivo volume removido é determinado em função da área de secção transversal da calote, A , equação (10), e do comprimento do eixo, l , equação (11).

$$A = \frac{(R^2)}{2} \times (\theta - \text{sen}\theta) \quad (10)$$

$$V = A \times l \quad (11)$$

Conforme foi referido para os ensaios de desgaste abrasivo, o modelo de análise gráfico é a melhor abordagem na determinação de uma taxa específica de desgaste e conseqüentemente um parâmetro de resistência ao desgaste.

Paralelamente à análise do atrito pela lei de Amontons-Coulomb, foi aplicada uma abordagem energética. A mesma consiste na determinação do coeficiente de atrito com recurso à energia dissipada no sistema por fricção.

O cálculo da energia dissipada pelo atrito é feito com base no trabalho da força de atrito ao longo do ensaio. Atendendo a que o ensaio se realiza com amplitude de deslocamento pico-a-pico ΔX_{p-p} constante e que a taxa de aquisição de dados não só é constante mas é muito superior à frequência do movimento, a expressão resulta muito simplificada e requer apenas o cálculo do valor médio eficaz da força de atrito, equação (12), (Ramalho, et al., 2005).

$$\Delta E = \int_x F_a dx = F_{a_{rms}} \times 2 \times \Delta X_{p-p} \times \Delta n^{\circ}_{ciclos} \quad (12)$$

Considerando k_E a taxa específica de desgaste definida com base na energia, então uma boa estimativa do coeficiente de atrito pode ser obtida através do quociente k/k_E , equações (13) (14).

$$k_E = \frac{V}{F_a \cdot X} \quad (13)$$

$$\frac{k}{k_E} = \frac{\frac{V}{N \cdot X}}{\frac{V}{F_a \cdot X}} = \frac{F_a}{N} = \mu_E \quad (14)$$

Os dois valores de coeficiente de atrito relativos aos ensaios de escorregamento são directamente comparáveis, o que suporta a validade do procedimento.

3.2.3.2. Procedimento no ensaio de escorregamento

Da mesma forma como foi tratado o procedimento em ensaios de abrasão, o presente procedimento segue os mesmos cânones. Resta adicionar a verificação do computador e do sistema de aquisição de dados. A interface com o utilizador é feita através de um programa em *LabView* em que se pode definir a frequência de aquisição, que por defeito foi de 60 segundos, o número total de leituras que será ajustado em função da duração do ensaio e definir o ficheiro onde se armazenam os valores de força de atrito e os correspondentes tempos. É também definida a frequência de rotação do veio, que por defeito foi de 35,2 rad/s.

Assim sendo o seguimento lógico será:

- Limpeza dos eixos em acetona em banho de ultra-sons para remoção de contaminantes e óxidos.
- Acoplar os eixos, de prova e contra prova, aos respectivos porta provetes, colocar o eixo de prova superior sob a mola que aplica a carga normal e o eixo de contra prova na base do suporte inferior.
- Verificar a colocação e posição relativa de ambos os eixos para garantir as condições de contacto anteriormente mencionadas. Limpeza das superfícies de contacto com solução de álcool etílico.
- Colocar os provetes em contacto, com cuidado para não criar defeitos de superfície. Sem aplicar carga, iniciar o equipamento de medida e posteriormente introduzir a carga desejada no sistema por deformação da mola. Permitir o equilíbrio térmico dos eixos.
- Reiniciar a placa de aquisição de célula de carga que mede a força de atrito, rever todas as variáveis de ensaio e condições de contacto. Iniciar o ensaio por tempo determinado, anotar os parâmetros de ensaio, a temperatura e a humidade relativa.
- Controlar as variáveis durante o ensaio e anotar no final o número de ciclos. Limpar a superfície de contacto e retirar as amostras do equipamento com cuidado.
- Observar a zona de contacto ao microscópio óptico e anotar as primeiras medições. Fotografar as marcas de desgaste com auxílio do microscópio óptico e respectiva máquina fotográfica.
- Limpeza das amostras com acetona em banho de ultra-sons e armazenamento das mesmas.
- Medição das dimensões características da zona de desgaste, cálculo do volume removido e análise dos dados de força de atrito retirados do computador.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O objectivo do presente estudo é encontrar tratamentos de superfície para os eixos actualmente aplicados nas correntes produzidas pela SRAMPort com o objectivo de reduzir o desgaste em serviço. Para obter resultados comparáveis foi necessário caracterizar os eixos fornecidos pela SRAMPort, que foram também utilizados como substratos na deposição dos revestimentos.

Inicialmente o estudo incidiu na quantificação da resistência ao desgaste por abrasão dos diferentes materiais, mas, face à natureza dos revestimentos à base de Carboneto de Tungsténio, foi necessário realizar também ensaios de escorregamento com o objectivo de avaliar o atrito e o desgaste em situação de contacto seco sem abrasivo.

No presente capítulo vão ser apresentados os resultados obtidos no seguimento lógico dos ensaios que permitiram classificar tanto os substratos como os revestimentos.

4.1. Caracterização de Substratos em Desgaste por Abrasão

A comparação entre componentes revestidos e substratos torna-se indispensável na presente fase da dissertação. Será proveitoso comparar as durezas dos materiais de base, Tabela 12, por forma poder classificar os mesmos, sendo que o substrato de referência será o Material B por ser actualmente usado pela SRAMPort.

Tabela 12 – Comparação de durezas.

Designação	Durezas (HV)	(%)
Material A	455± 20	66%
Material B	694± 32	100%
M2	863± 18	124%

Seria de esperar que a resistência à abrasão tivesse um comportamento similar à dureza dos materiais, não obstante, não é possível de determinar o comportamento dos mesmos atendendo só à sua dureza.

Para efeitos de resistência à abrasão, e pelo procedimento e metodologia anteriormente descrita, vão ser apresentados os valores das medições pontuais e respectivos valores de severidade, altura de desgaste e volume removido.

O número considerável de ensaios aliciou a criação de folhas de controlo onde vão constar todos os valores relativos aos ensaios e respectivas amostras, o que permite a análise posterior dos eixos sempre que for necessário.

Em primeiro lugar foi caracterizado o Material A e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13. É necessário salientar que o material em questão necessitou de um número de ensaios elevado porque apresentava, em muitos dos casos de ensaio, a formação de uma zona de desgaste por adesão, o que modificava a geometria da zona de deformação plástica.

Tabela 13 – Registo de medições e valores calculados para o Material A em desgaste.

Folha de Ensaios								
Nº	Carga (N)	Ciclos	a (mm)	b (mm)	h (mm)	V (mm³)	χ (m)	N.X
1	1,5	100	1,252	0,772	0,0408	0,0156	3,12	4,67
2	2	100	1,320	0,817	0,0455	0,0195	3,12	6,23
3	2,5	100	1,326	0,853	0,0479	0,0215	3,12	7,79
4	3	100	1,412	0,850	0,0507	0,0241	3,12	9,35
5	1,5	200	1,473	0,836	0,0521	0,0255	6,23	9,35
6	2	200	1,542	0,911	0,0594	0,0332	6,23	12,47
7	2,5	200	1,681	0,967	0,0689	0,0446	6,23	15,58
8	3	200	1,723	1,002	0,0733	0,0504	6,23	18,70
9	1,5	400	1,540	0,917	0,0598	0,0335	12,47	18,70
10	2	400	1,730	1,015	0,0745	0,0521	12,47	24,93
11	2,5	400	1,780	1,081	0,0818	0,0628	12,47	31,16
12	3	400	1,879	1,145	0,0916	0,0788	12,47	37,40
13	1,5	600	1,667	1,015	0,0718	0,0484	18,70	28,05
14	2	600	1,808	1,095	0,0842	0,0665	18,70	37,40
15	2,5	600	2,018	1,208	0,1040	0,1016	18,70	46,75
16	3	600	2,145	1,270	0,1165	0,1275	18,70	56,10
17	1,5	800	1,953	1,160	0,0965	0,0875	24,93	37,40
18	2	800	1,968	1,178	0,0988	0,0917	24,93	49,86
19	2,5	800	2,094	1,254	0,1122	0,1183	24,93	62,33
20	3	800	2,114	1,264	0,1143	0,1226	24,93	74,80

A Tabela 13 apresenta tanto as grandezas medidas como as incógnitas chave a calcular. A sua análise é complementada com o tratamento gráfico da Figura 18.

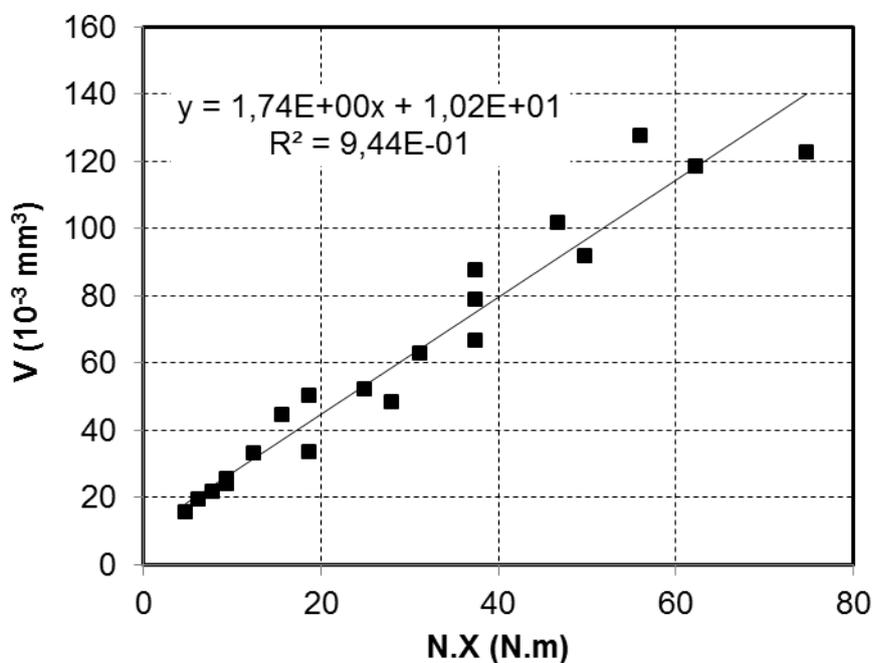


Figura 18 – Representação do volume removido em função da severidade do Material A.

É possível observar alguma dispersão nos pontos do gráfico o que traria consequências na análise individual das taxas específicas de desgaste, não obstante, o elevado coeficiente de correlação de Pearson da recta de regressão linear significa que o método de cálculo presente é bastante eficaz.

O segundo substrato a caracterizar, o Material B, apresenta zonas de contacto melhor definidas que o anterior, sendo que foram necessários menos ensaios para caracterizá-lo.

As condições de ensaio e respectivos resultados apresentam-se na Tabela 14 e numa primeira observação verifica-se que os volumes de desgaste são ligeiramente inferiores comparando com o Material A nas respectivas condições.

Tabela 14 - Registo de medições e valores calculados para o Material B em desgaste.

Folha de ensaios								
Nº	Carga (N)	Ciclos	a (mm)	b (mm)	h (mm)	V (mm³)	χ (m)	N.X
1	1,5	100	1,181	0,719	0,0355	0,0119	3,13	4,69
2	2	100	1,260	0,746	0,0394	0,0146	3,13	6,26
3	2,5	100	1,321	0,798	0,0442	0,0185	3,13	7,82
4	3	100	1,383	0,827	0,0480	0,0217	3,13	9,39
5	1,5	200	1,372	0,829	0,0477	0,0215	6,26	9,39
6	2	200	1,481	0,887	0,0552	0,0288	6,26	12,52
7	2,5	200	1,521	0,929	0,0594	0,0334	6,26	15,65
8	3	200	1,606	0,964	0,0652	0,0401	6,26	18,77
9	1,5	400	1,597	0,957	0,0643	0,0391	12,52	18,77
10	2	400	1,695	1,028	0,0735	0,0510	12,52	25,03
11	2,5	400	1,843	1,100	0,0857	0,0693	12,52	31,29
12	3	400	1,842	1,115	0,0868	0,0712	12,52	37,55
13	1,5	600	1,719	1,040	0,0754	0,0537	18,77	28,16
14	2	600	1,825	1,119	0,0864	0,0704	18,77	37,55
15	2,5	600	1,858	1,136	0,0893	0,0753	18,77	46,94
16	3	600	1,977	1,180	0,0988	0,0923	18,77	56,32
17	1,5	800	1,848	1,109	0,0866	0,0709	25,03	37,55
18	2	800	1,918	1,159	0,0941	0,0836	25,03	50,06
19	2,5	800	2,003	1,213	0,1030	0,1003	25,03	62,58
20	3	800	2,070	1,258	0,1106	0,1156	25,03	75,10

No seguimento do modelo apresentado vem a análise gráfica, Figura 19, que permite a determinação do valor de k igualmente com um coeficiente de correlação bastante elevado.

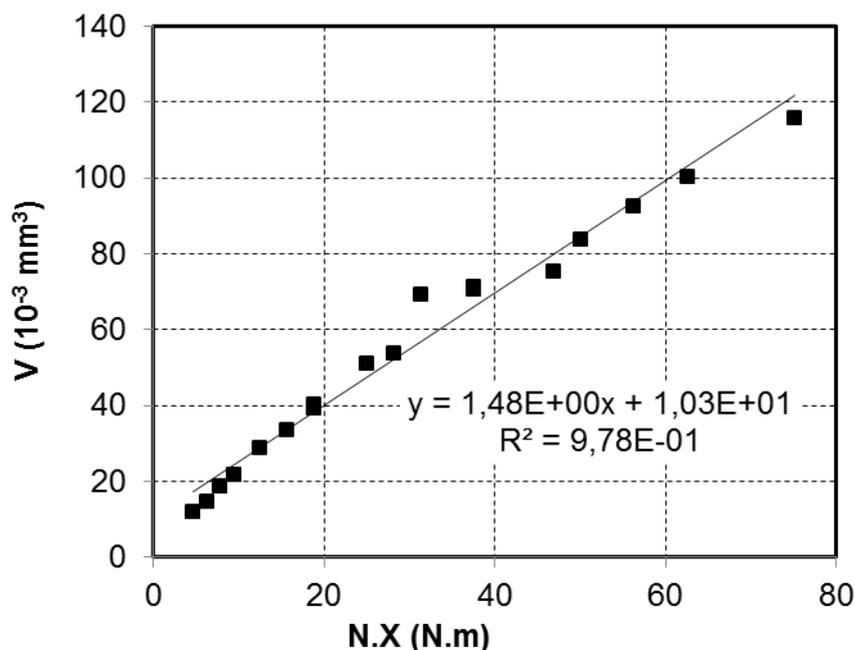


Figura 19 - Representação do volume removido em função da severidade do Material B.

É visível uma ligeira diminuição na taxa específica de desgaste em comparação com o material A o que indica uma maior resistência ao desgaste, Tabela 15. Uma menor dispersão dos pontos é sinónimo de uma melhor aproximação dos resultados.

Tabela 15 – Comparação da taxa específica de desgaste k entre os materiais A e B.

	Material A	Material B
k ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)	1,74E-3	1,48E-3

Com base nos resultados anteriores, a selecção do substrato é imediata, caindo a escolha no Material B, sabendo também que a morfologia da zona de desgaste predominante em ambos os materiais é de desgaste a dois corpos, como se pode observar na Figura 20.

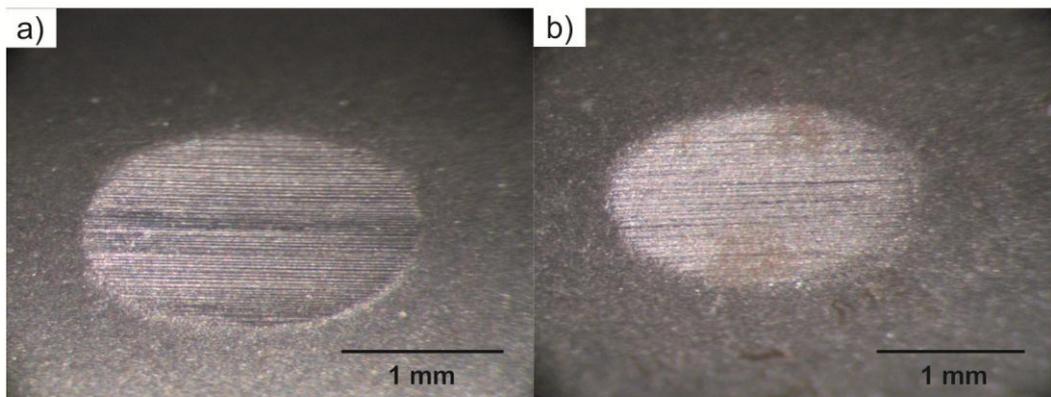


Figura 20 – Zona de desgaste a dois corpos, 1,5N – 100 ciclos: a) do Material B; b) do Material A.

4.2. Caracterização de Revestimentos em desgaste por Abrasão

O primeiro revestimento a ser ensaiado ao desgaste abrasivo foi a Balinit C o qual obrigou a modificar algumas condições de ensaio, como se referiu anteriormente. Assim, na presente secção vão ser apresentados os resultados somente das novas condições de ensaio, sendo que os poucos ensaios realizados com as condições iniciais revelaram que o revestimento não acrescenta qualquer resistência ao substrato.

A Tabela 16 apresenta as medições realizadas assim como o volume total de material removido e o volume de material removido no substrato.

Tabela 16 – Registo de medições e valores calculados para eixos revestidos por Balinit C em desgaste.

Folha de Ensaios						
Nº	Carga (N)	Ciclos	Medidas (mm)			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a_s</i>	<i>b_s</i>
1	0,2	10	0,479	0,330		
2	0,2	20	0,622	0,364		
3	0,2	30	0,665	0,368		
4	0,2	40	0,650	0,402	0,312	0,178
5	0,2	70	0,675	0,381	0,418	0,237
6	0,2	100	0,786	0,425	0,510	0,292
7	0,2	130	0,864	0,521	0,650	0,361
8	0,2	160	0,908	0,540	0,676	0,380
Nº	<i>h</i> (mm)	<i>h_s</i> (mm)	<i>V</i> (mm ³)	<i>V_s</i> (mm ³)	<i>X</i> (m)	<i>N.X</i>
1	0,0066		0,00042		0,31	0,06
2	0,0094		0,00084		0,62	0,12
3	0,0102		0,00099		0,93	0,19
4	0,0109	0,0023	0,001121	0,000051	1,25	0,25
5	0,0107	0,0041	0,001090	0,000161	2,18	0,44
6	0,0140	0,0062	0,001856	0,000364	3,12	0,62
7	0,0188	0,0098	0,003334	0,000909	4,05	0,81
8	0,0205	0,0107	0,003959	0,001088	4,99	1,00

A representação gráfica dos resultados, Figura 21, apresenta um menor número de pontos mas possui uma baixa dispersão e um elevado coeficiente de correlação.

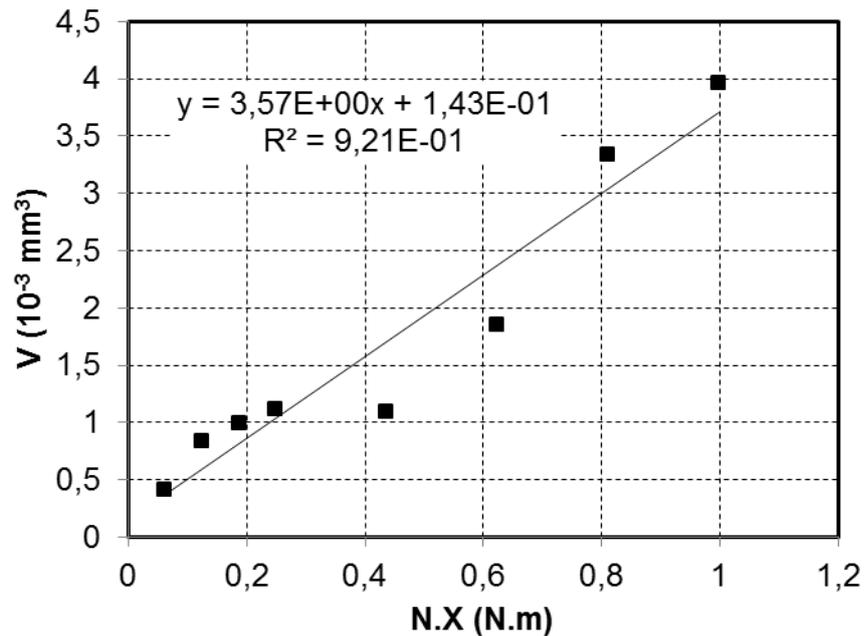


Figura 21 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos revestidos por Balinit C.

Em primeira análise é possível afirmar que a taxa específica de desgaste do revestimento é superior ao substrato, conseqüentemente a sua resistência à abrasão é inferior e que o tipo de desgaste por abrasão predominante é o desgaste por abrasão a dois corpos, Figura 22.

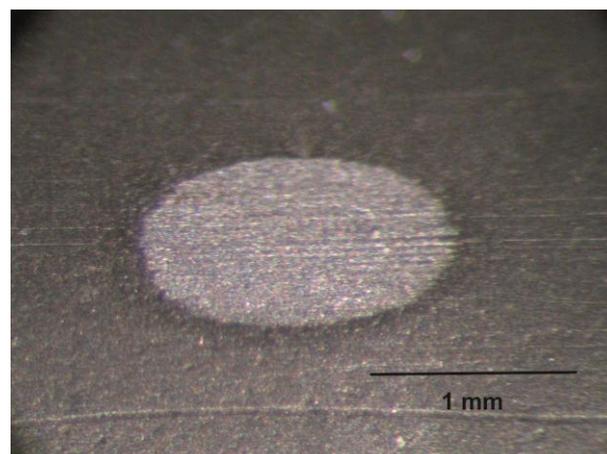


Figura 22 – Zona de desgaste por abrasão a dois corpos do Material B revestido com Balinit C, 0,2N – 160 ciclos.

A razão pela qual não foi realizada caracterização em abrasão para o M2 revestido com CrAlZr(N) deve-se a falta de adesão do revestimento ao substrato, na primeira tentativa de deposição. Os ensaios de escorregamento revelaram essa deficiência,

e visto que o único propósito de aplicação do M2 seria suportar um revestimento duro, cujas temperaturas de revestimento pudessem ser elevadas, a caracterização ao desgaste do M2 como substrato também não é justificável. No seu lugar será caracterizado o CrAlZr(N) depositado sobre o substrato B.

A representação gráfica, Figura 23, permite a determinação do valor de k igualmente com um coeficiente de correlação bastante elevado. Todavia, é possível observar alguma dispersão nos pontos, no entanto, uma análise detalhada permitiu verificar que os pontos representados por triângulos no gráfico seguem a linha de tendência do substrato B. Este comportamento deve-se à falta de adesão do revestimento ao substrato em algumas situações. Assim sendo, só serão considerados os pontos representados por circunferências.

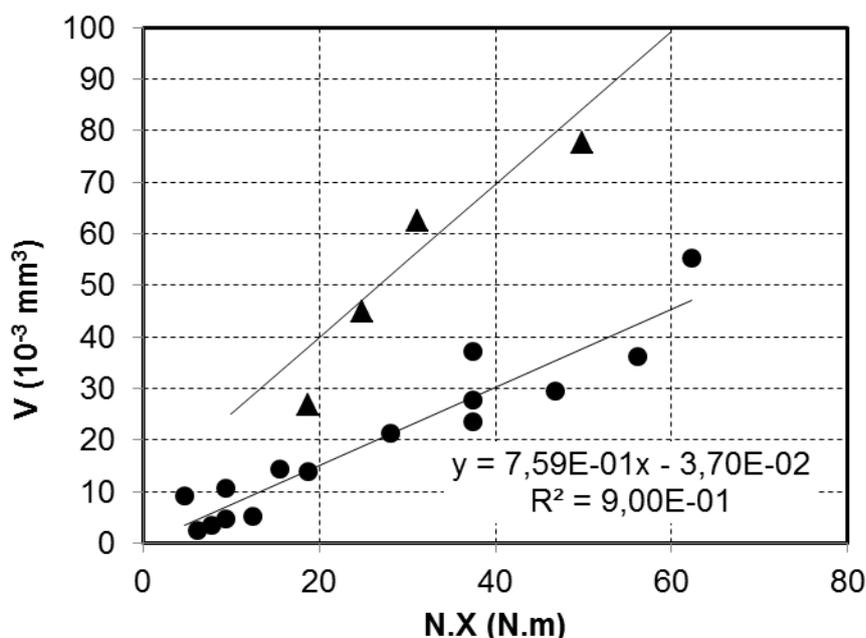


Figura 23 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos revestidos por CrAlZr(N).

Como este revestimento se mostrou razoavelmente resistente ao desgaste por abrasão, foi necessário incluir neste estudo a solução actualmente utilizada pela SRAMPort, um revestimentos duro de carboneto de cromo com a designação comercial Delta, Figura 24.

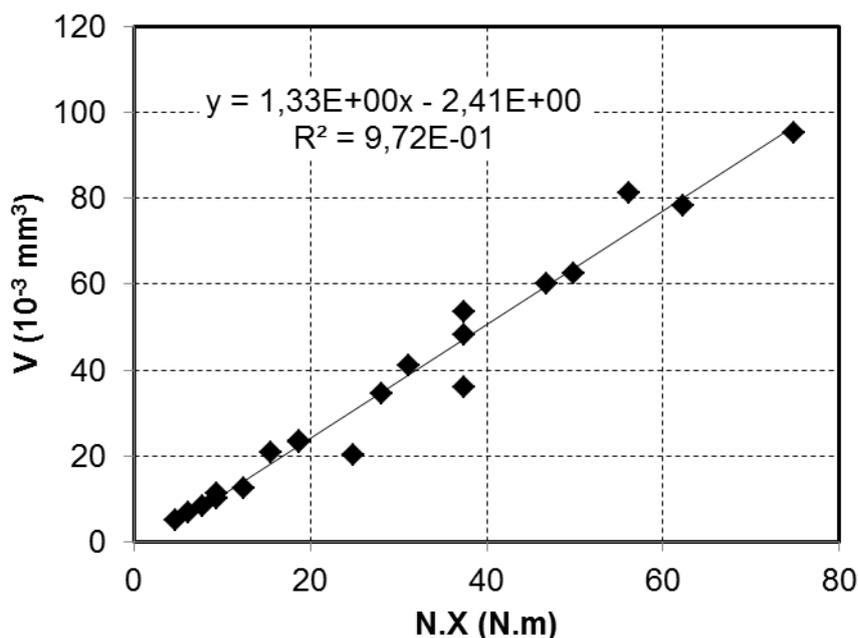


Figura 24 - Representação do volume removido em função da severidade dos eixos Delta.

A Tabela 17 permite verificar que a resistência ao desgaste do substrato B revestido com CrAlZr(N) é superior ao Delta, o que abre novas perspectivas de utilização.

Tabela 17 - Comparação da taxa específica de desgaste k entre os eixos Delta e os eixos revestidos por CrAlZr(N).

	Delta	CrAlZr(N)
k (mm ³ /N.m)	1,33E-3	7,59E-4

4.2.1. Substratos vs Revestimentos

Como um dos objectivos primários é a identificação de tratamentos de superfície que melhorem a resistência ao desgaste dos componentes, a comparação de substratos e substratos revestidos é inevitável. Assim sendo, a Figura 25 apresenta a taxa específica de desgaste por abrasão para cada material e a respectiva comparação, tomando como referência o Material B não revestido.

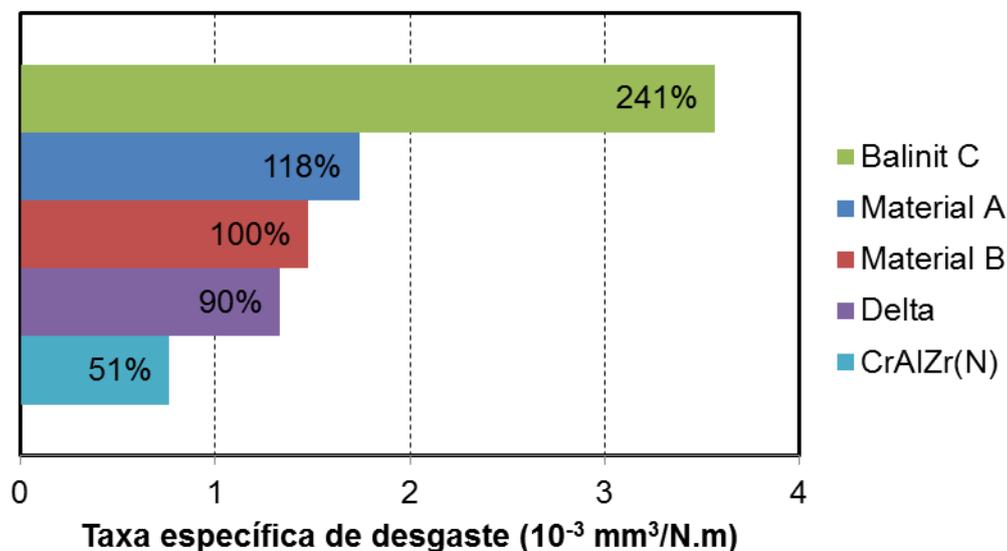


Figura 25 – Comparação de k entre materiais.

A aplicação de revestimentos do tipo WC/C não traz melhorias no campo da resistência ao desgaste por abrasão, visto que o revestimento Balinit C apresenta um valor de k pelo menos duas vezes superior ao verificado para o substrato não revestido.

Em suma, como os revestimentos do tipo WC/C não introduzem resistência ao desgaste por abrasão, e pelo facto de o Delta possuir uma resistência ao desgaste superior a qualquer dos substratos não revestido aqui apresentados, a sua aplicação como revestimento resistente à abrasão não apresenta vantagens face à solução actual.

É notável a elevada resistência ao desgaste do CrAlZr(N), por apresentar a menor taxa específica de desgaste de entre todos os materiais testados.

4.3. Caracterização em ensaios de escorregamento

Os ensaios de escorregamento foram inseridos no presente estudo com um objectivo claro, a análise do comportamento dos revestimentos enquanto lubrificantes sólidos, e consequentemente a diminuição do desgaste por escorregamento, pela sua acção como redutores do atrito.

A caracterização dos resultados deste tipo de ensaios permite obter dois de desempenho: o coeficiente de atrito, Figura 26, e a taxa específica de desgaste em contacto com deslizamento seco, Figura 27. A título de exemplo serão apresentados valores de atrito e desgaste para o Material B.

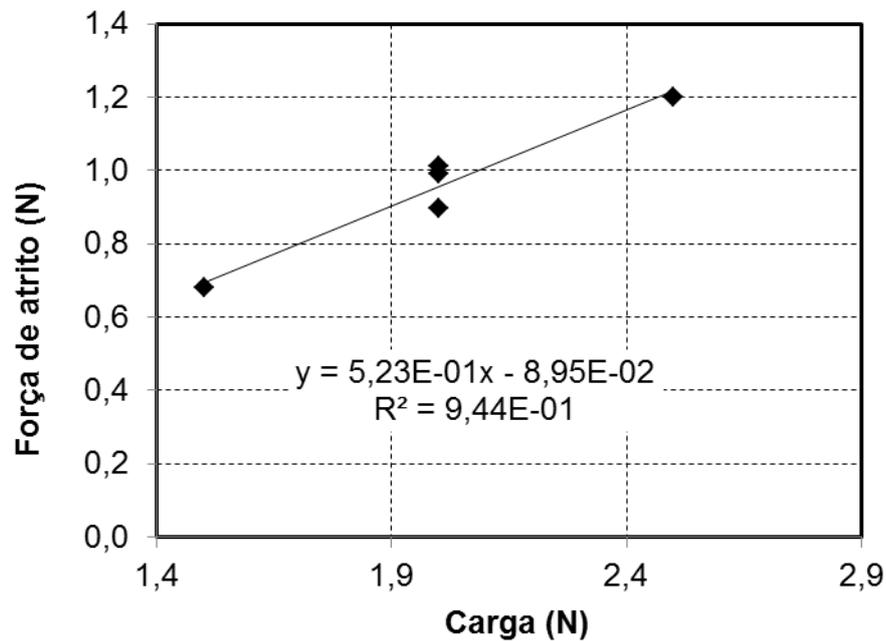


Figura 26 – Representação da força de atrito em função da carga normal aplicada para o Material B.

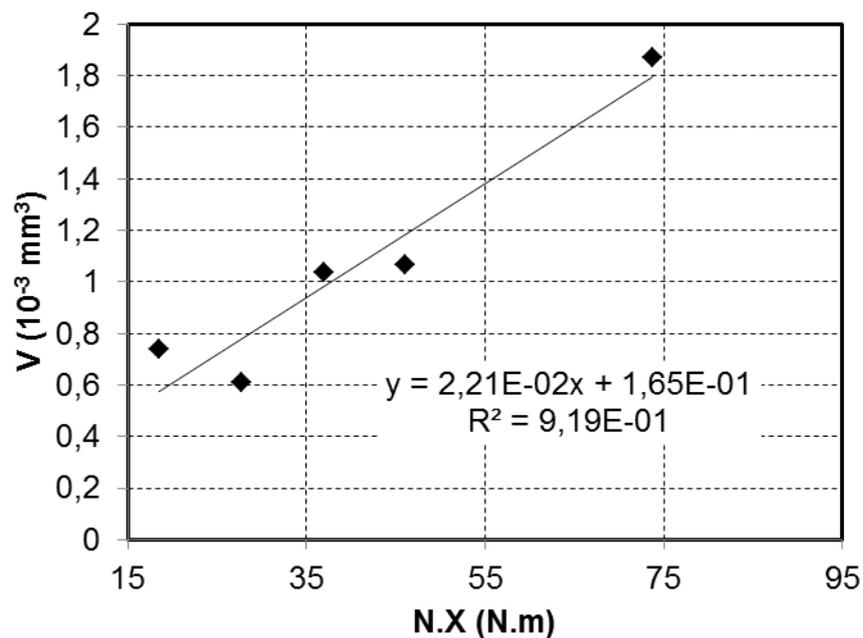


Figura 27 - Representação do volume removido sobre a severidade do Material B (escorregamento.)

A representação da força de atrito em função da carga normal aplicada permite determinar o coeficiente de atrito do material, como foi referido no capítulo anterior. Trata-se de um processo directo que pode ser confrontado pela abordagem energética

anteriormente descrita no procedimento de ensaio. Esta abordagem necessita dos parâmetros de desgaste, os quais cumprem um dos propósitos da sua determinação. O segundo propósito é o controlo das condições de ensaio, as quais podem não apresentar um comportamento linear durante a evolução do ensaio.

Finalmente, com o intuito de elucidar quais os materiais com um melhor comportamento ao escorregamento apresenta-se a Tabela 18, onde se resumem os resultados obtidos.

Tabela 18 – Parâmetros de escorregamento: (1) – Coeficiente de atrito relativo à lei de Amontons-Coulomb; (2) - Coeficiente de atrito relativo à abordagem energética.

Designação	k (mm ³ /N.m)	k_E (mm ³ /J)	μ	μ_E
Material B - Antagonista	2,21E-05	4,43E-05	5,23E-01	4,99E-01
Balinit C - Antagonista	7,41E-06	2,67E-05	3,19E-01	2,78E-01
IPN - Antagonista	9,20E-06	2,81E-05	2,33E-01	3,27E-01
Balinit C – Balinit C	1,07E-05	4,00E-05	2,77E-01	2,68E-01
IPN – IPN	8,44E-06	4,03E-05	2,07E-01	2,09E-01
Delta - Antagonista	3,84E-05	6,03E-05	5,33E-01	6,37E-01
CrAlZr(N) - Antagonista	9,74E-05	1,68E-04	3,67E-01	5,80E-01

Toda a análise referente aos valores apresentados é aplicada separadamente. Isto porque, tomando em consideração os valores do coeficiente de atrito, os mesmos podem ser comparados directamente, situação que é desaconselhável para as taxas específicas de desgaste. Tal situação sucede porque, mesmo tratando-se de ensaios realizados em laboratório com condições semelhantes e controladas, a interação entre superfícies pode e leva muitas vezes a resultados de atrito e desgaste díspares.

Os resultados apresentados para os ensaios de CrAlZr(N) contra o antagonista referem-se ao M2 revestido na segunda tentativa, e como tal com o problema de adesão já resolvido.

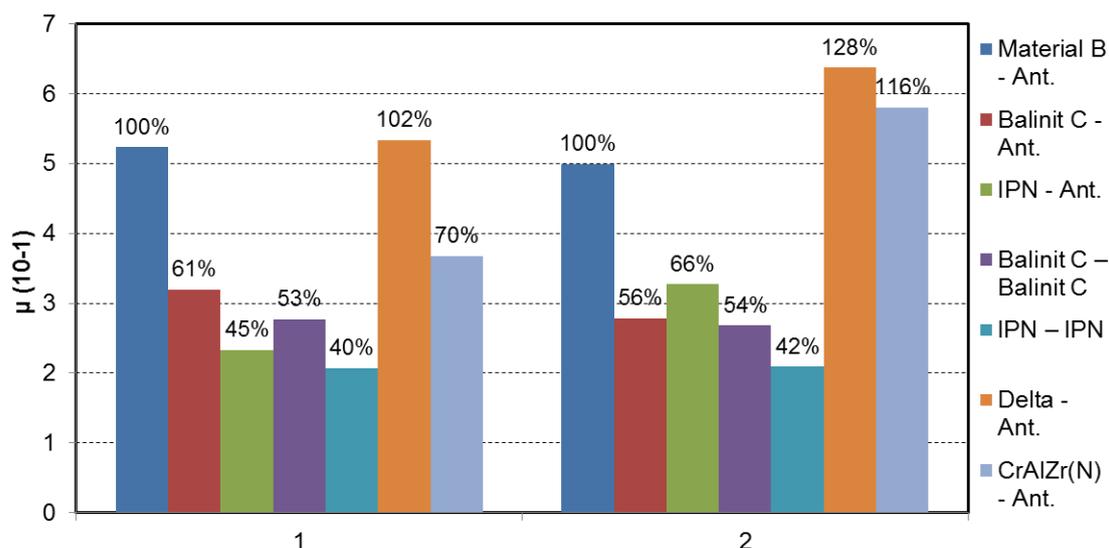


Figura 28 – Comparação de coeficiente de atrito: (1) – Relativo à lei de Amontons-Coulomb; (2) - Relativo à abordagem energética.

Uma análise cuidada sobre a Figura 28 indica que os revestimentos do tipo WC/C introduzem uma diminuição significativa no coeficiente de atrito, em média de 50% do valor de referência. Estes resultados remetem para a utilização deste tipo de revestimentos em aplicações com ambiente fechado e controlado, que possibilite a diminuição ou eliminação dos agentes abrasivos. Em adição, os coeficientes de atrito do Delta e do CrAlZr(N) são muito próximos ao do material de referência, e sendo estes revestimentos duros com boas propriedades de resistência à abrasão, torna-os excelentes soluções nas situações onde coexiste abrasão e contacto seco.

No decorrer dos ensaios, foi observado o comportamento dos materiais e respectivos mecanismos de desgaste. No caso do Substrato B, observa-se claramente em todos os ensaios a transferência de material por adesão, que oxida e apresenta uma cor avermelhada, Figura 16. Este mecanismo de oxidação, também referido por tribo-oxidação, permite que o coeficiente de atrito estabilize a partir de um determinado instante no tempo e atenua o processo de desgaste.

No caso do substrato revestido por Balinit C em contraste com o antagonista, o processo de desgaste define-se pela transferência de material do revestimento para o antagonista e criação de uma película de material do revestimento sobre a zona de material removido da amostra, Figura 29. Este fenómeno permite a diminuição do atrito e estabilização do processo visto que, em nenhuma das condições a espessura do revestimento foi ultrapassada.

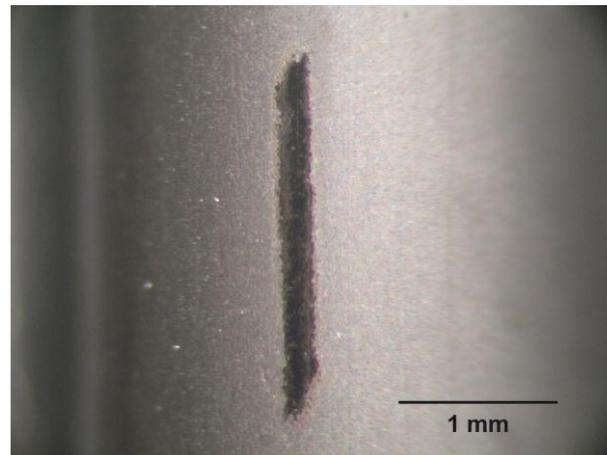


Figura 29 - Fotografia da zona de contacto, Balinit C – 12.10, 2N – 120 minutos.

Tal como a Balinit C, o protótipo WC/C do IPN contra o antagonista apresenta valores de atrito bastante baixos, em relação ao material de referência. Aqui o processo de desgaste apresenta-se similar ao anterior, mas com formação de placas soltas na periferia da cratera, Figura 30, o que leva a uma estabilização mais rápida do processo e com valores de atrito ligeiramente inferiores. Outro factor que contribui para a estabilização de um valor reduzido de atrito é o polimento da zona de contacto. O principal constituinte das placas é o material revestimento, como se verifica na análise metalográfica, Figura 31.

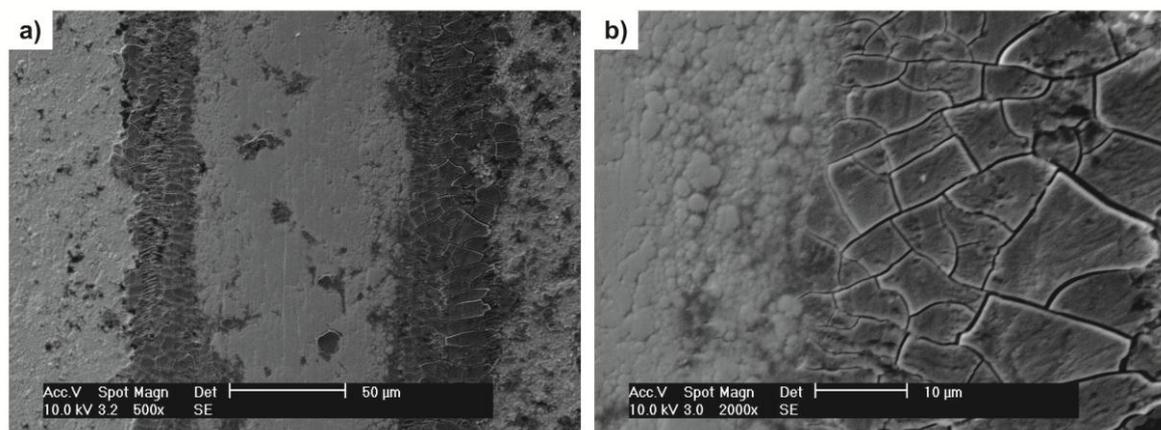


Figura 30 – Fotografia da zona de desgaste do protótipo do IPN em SEM: a) zona de desgaste; b) periferia da zona de desgaste.

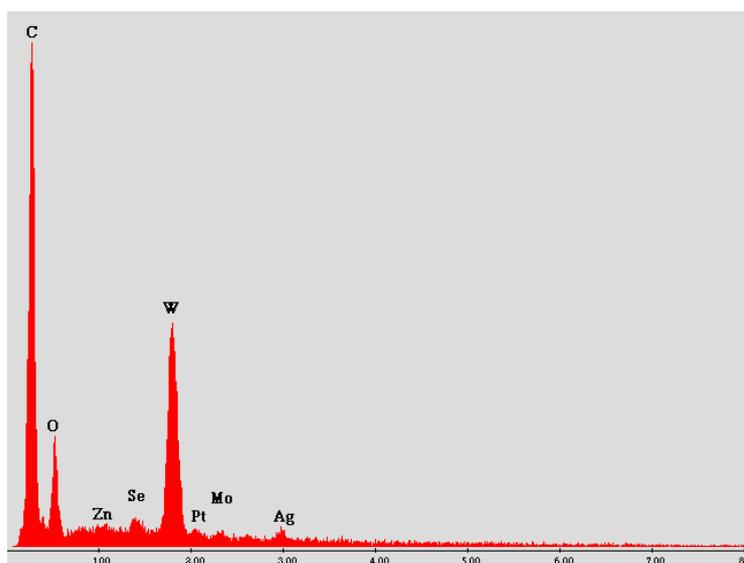


Figura 31 – Composição química das placas ilustradas na figura 24.

Ainda nos revestimentos auto - lubrificantes, quando ensaiados contra eles mesmos, confirmou-se a presença de uma morfologia da zona de desgaste que se define especialmente por um polimento da mesma, Figura 32. Apesar de serem também visíveis sinais ligeiros de abrasão, o polimento implica penetrações inferiores nos componentes, atritos bastante inferiores à referência e processos de fricção estacionários, em todas as condições aplicadas.

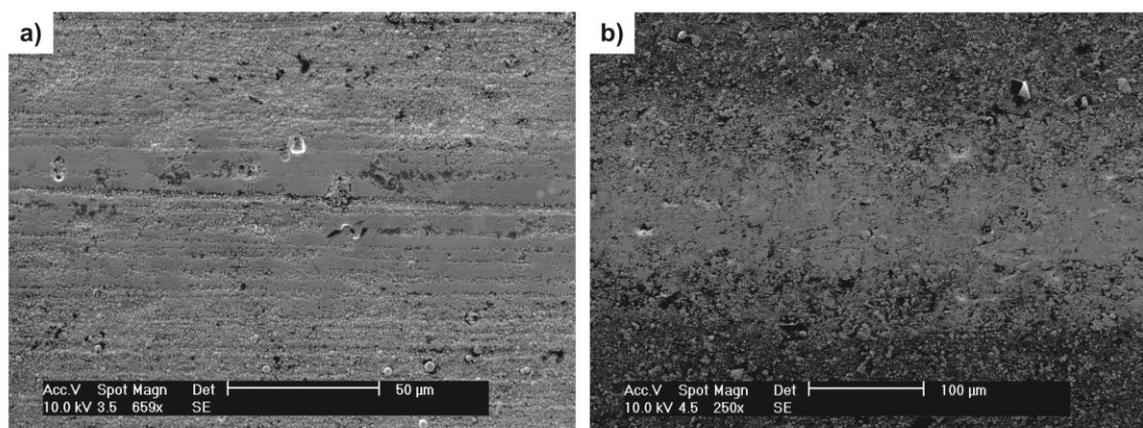


Figura 32 – Polimento da zona de contacto: a) Balinit C, 2N – 180 minutos; b) protótipo IPN, 2N – 120 minutos.

Quanto aos ensaios do revestimento Delta contra o 12.10 é possível verificar dois comportamentos distintos que provocam respostas no atrito diferentes. Um deles provoca um menor atrito, ainda que de valor elevado se comparado com o verificado para

os revestimentos de baixo atrito, e apresenta-se como a formação de uma película descontínua de partículas oxidadas, proveniente do antagonista, que adere ao eixo diminuindo o atrito e protegendo o revestimento, Figura 33. A observação detalhada da Figura 33 b) mostra que as placas resultam da aglomeração de partículas de óxidos submicrométricas.

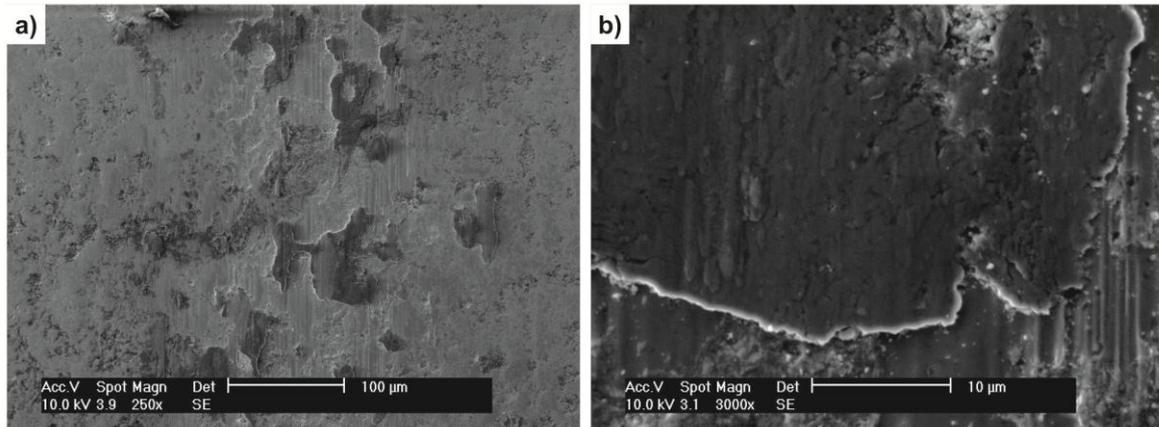


Figura 33 – Zona de desgaste Delta – antagonista, 2N – 60 minutos: a) cratera de desgaste; b) formação de película.

O segundo comportamento que se verifica induz um maior coeficiente de atrito por apresentar placas de transferência de material não oxidado, Figura 34. O processo é bastante instável porque estas camadas adicionais fissuram quase de imediato devido às tensões de contacto e às tensões internas resultantes do processo de aglomeração e são facilmente removidas. Todos os ensaios apresentavam uma fase inicial de aumento de atrito, seguido de um decréscimo e regime de estabilização.

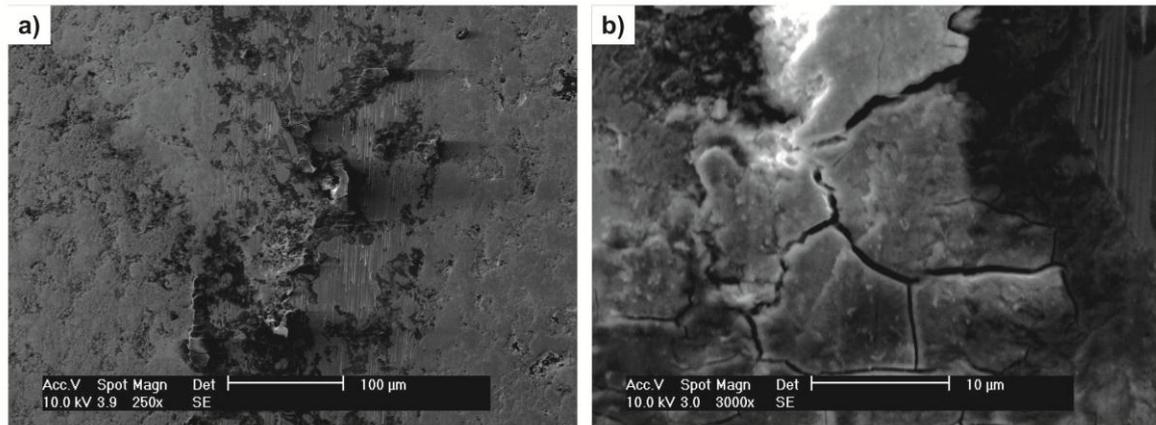


Figura 34 - Zona de desgaste do revestimento Delta – antagonista, 2,5N – 60 minutos: a) cratera de desgaste; b) formação de placas.

Os ensaios realizados com o substrato M2 não se apresentaram regulares, por isso a sua ausência na comparação com os restantes materiais. De facto a adesão deste revestimento ao substrato de M2 foi bastante deficiente, na primeira tentativa de aplicação do revestimento, como o revelaram ensaios de scratch test feitos posteriormente e fora do âmbito do presente trabalho. O M2 apresenta dois tipos de comportamento, um de baixo atrito e outro de atrito elevado, Figura 35, os quais não permitiram a sua correcta caracterização.

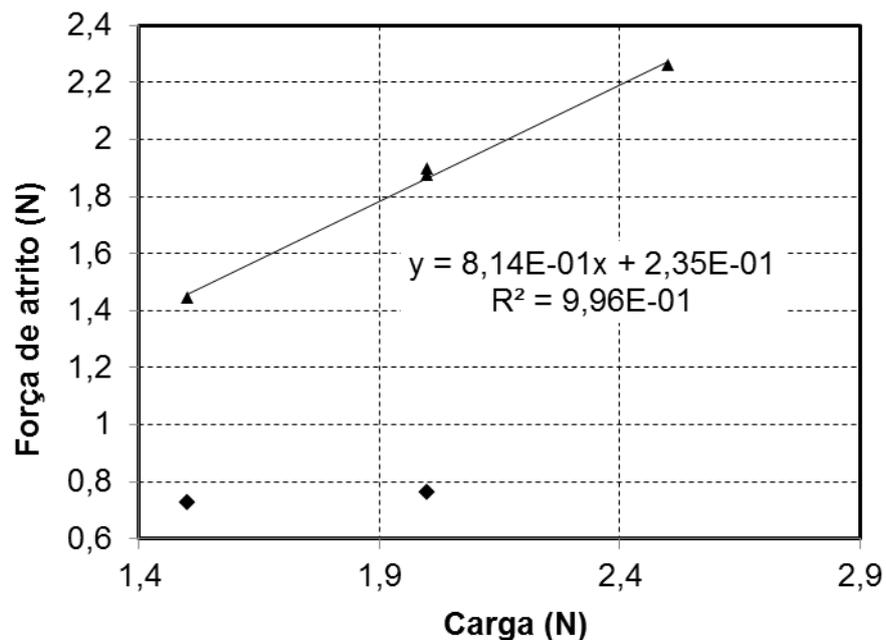


Figura 35 - Representação da força de atrito sobre a carga aplicada do M2.

O mecanismo estacionário que se apresenta depois de atingida a energia mínima necessária introduz um coeficiente de atrito bastante elevado. Não obstante, o mesmo mecanismo apresenta características de um processo estacionário e mantém o atrito constante ao longo dos ensaios. Trata-se da formação de zonas planalto, Figura 36, que não são mais do que partículas aglomeradas de óxidos.

Um parâmetro que pode influenciar o atrito no ensaio do M2 é o estado superficial da amostra, que se verifica não ser muito regular.

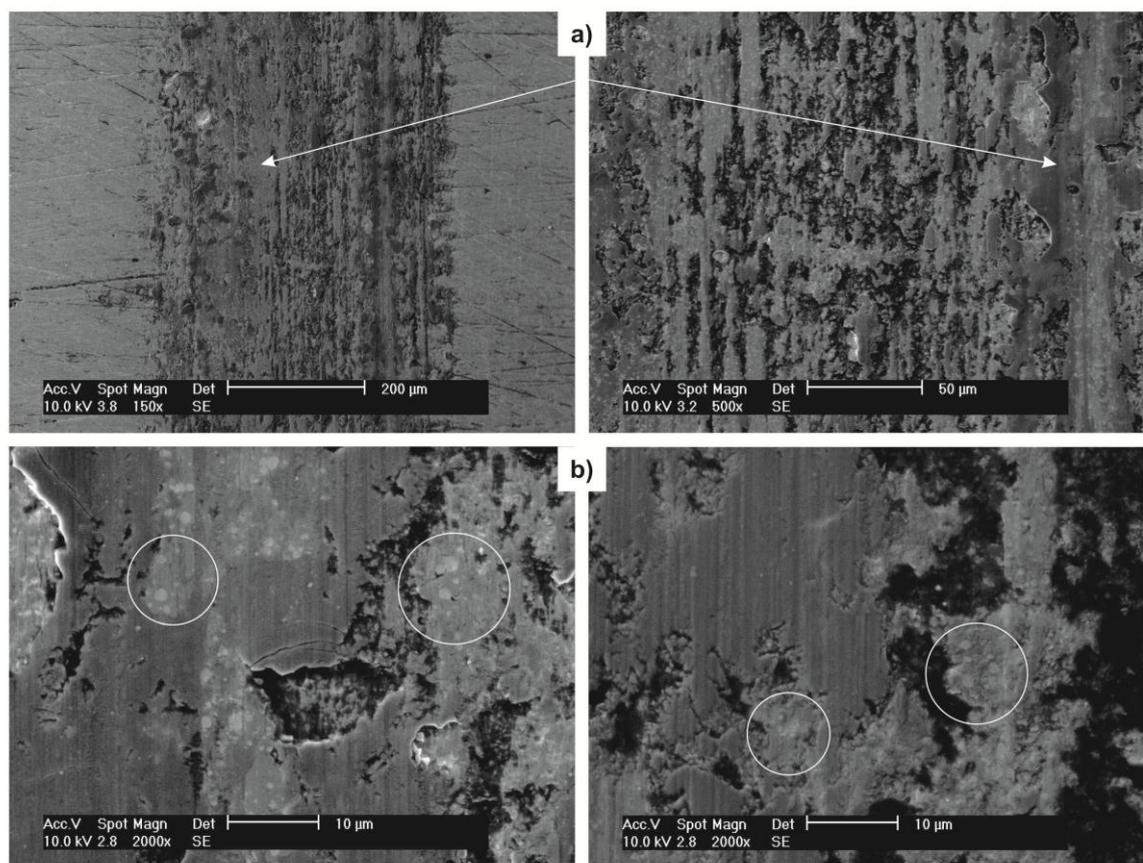


Figura 36 - Zona de desgaste M2, 2,5N – 60 minutos: a) Zonas de planaltos; b) identificação de partículas de transferência oxidadas cuja aglomeração dá origem à formação de placas.

Em ultima instância, apresenta-se o substrato M2 revestido por CrAlZr(N) na primeira tentativa antes da resolução dos problemas de adesão. Apesar destes resultados não serem representativos do comportamento deste material, devido aos problemas de adesão já referidos, optou-se pela sua introdução como justificativo da falta de adesão.

Como se pode observar pela Figura 37, os provetes revestidos na primeira tentativa, na zona de desgaste o revestimento foi completamente removido e nas proximidades externas à zona de desgaste é possível observar a presença de placas de

revestimento. Pode-se dizer que o revestimento foi arrancado em lamelas e não como consequência das condições do ensaio, visto que todos os ensaios apresentaram o mesmo comportamento.

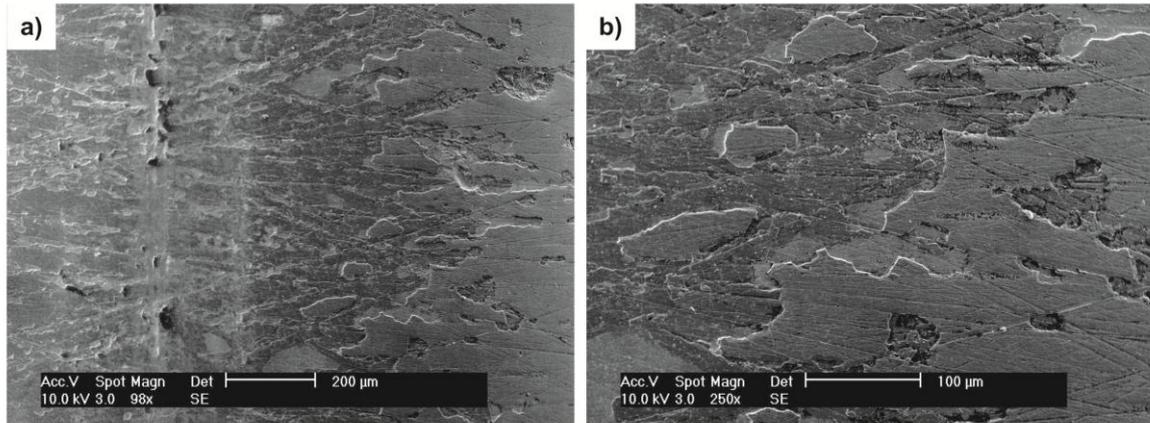


Figura 37 – Zona de desgaste CrAlZr(N), 2N – 120 minutos: a) zona de contacto sem revestimento; b) presença de revestimento proximidade da periferia da zona de contacto.

No caso dos provetes revestidos na segunda tentativa de aplicação do revestimento não foi possível observar a zona de contacto por microscopia electrónica, no entanto pelos valores apresentados na Tabela 18 e na Figura 38 pode-se dizer que a adesão é aceitável e que o comportamento do material em escorregamento é similar aos do substrato de referência.

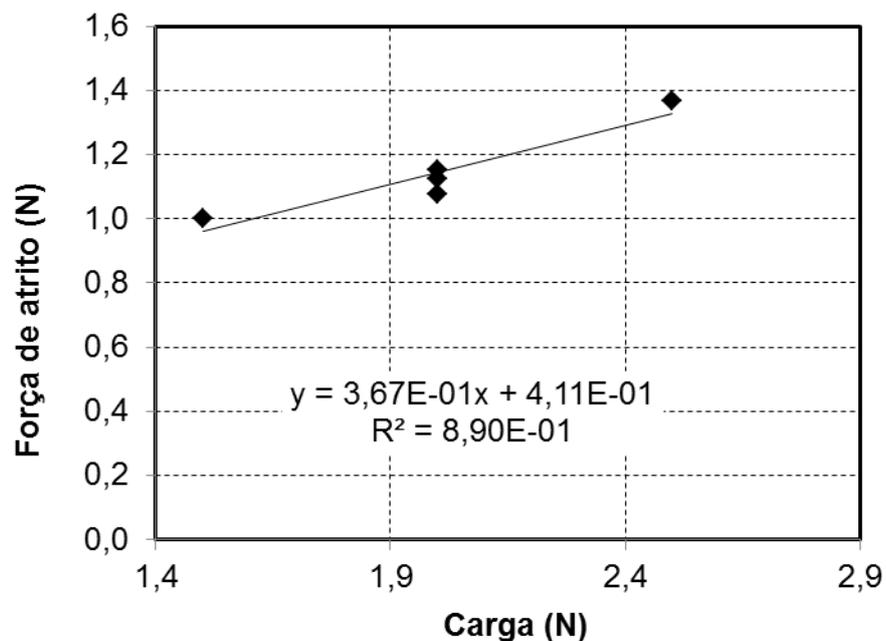


Figura 38 - Representação da força de atrito em função da carga normal aplicada para o CrAlZr(N), segunda aplicação.

4.4. Análise de fiabilidade

Em paralelo ao estudo anterior, aplicou-se um modelo de análise de fiabilidade que vem sendo usado no Departamento de Engenharia Mecânica nos últimos anos (Ramalho, 2010). O propósito é permitir obter a partir dos mesmos resultados, estimativas mais fiáveis.

Os resultados da Tabela 19 correspondem ao tratamento dos resultados dos ensaios de abrasão.

Tabela 19 – Análise de fiabilidade em desgaste.

Designação	Taxa específica de desgaste k (mm ³ /N.m)		Coeficiente de correlação R ²	Intervalo de confiança (95%)	
	Média	Desvio padrão			
Material A	1,74E-03	9,94E-05	0,944	1,53E-03	1,94E-03
Material B	1,49E-03	5,23E-05	0,978	1,38E-03	1,60E-03
Balinit C	3,57E-03	4,26E-04	0,921	2,53E-03	4,61E-03
Delta	1,33E-03	5,25E-05	0,973	1,22E-03	1,44E-03
CrAlZr(N)	7,58E-04	7,05E-05	0,899	6,05E-04	9,10E-04

No presente caso em que o parâmetro de comparação é a taxa específica de desgaste, a melhor aproximação possível para comparação será o valor superior dentro do intervalo de confiança. Isto porque, esse valor será o máximo a esperar, em 95% dos casos.

O desvio padrão é, no mínimo, uma ordem de grandeza inferior e duas na maior parte dos casos em estudo, o que se traduz numa dispersão de resultados baixa.

Uma análise semelhante foi aplicada aos ensaios de escorregamento, sendo o critério de comparação o coeficiente de atrito, Tabela 20. A ausência de análise para o M2 deve-se à existência de dois mecanismos de desgaste díspares, e baixo número de amostras.

Tabela 20 - Análise de fiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios de escorregamento.

Designação	Coeficiente de atrito		Coeficiente de correlação R^2	Intervalo de confiança (95%)	
	Média	Desvio padrão			
Material B - Antagonista	5,23E-01	7,34E-02	0,944	2,89E-01	7,56E-01
Balinit C - Antagonista	3,19E-01	5,91E-02	0,936	6,47E-02	5,73E-01
Balinit C - Antagonista	2,33E-01	1,35E-02	0,993	1,75E-01	2,91E-01
Balinit C – Balinit C	2,77E-01	3,40E-02	0,957	1,69E-01	3,86E-01
IPN - IPN	2,07E-01	2,25E-02	0,977	1,10E-01	3,04E-01
CrAlZr(N) - Antagonista	3,67E-01	7,46E-02	0,890	1,30E-01	6,05E-01

A análise anterior remete para a conclusão mencionada na secção anterior, que indica que para cada material, os valores de coeficiente de atrito possuem uma dispersão admissível.

5. CONCLUSÃO

Com a introdução da transmissão de potência por corrente na bicicleta, iniciou-se um processo de desenvolvimento que a tornou num dos meios de transporte e objecto de lazer mais usado pela sociedade moderna.

O objecto de estudo do presente trabalho foi estudar em laboratório o desgaste das correntes de bicicleta, mais precisamente, o do eixo de ligação das placas e a possibilidade de incorporar novos tratamentos de superfície para o mesmo. Foi estudado o desgaste em condições de desgaste abrasivo, o atrito e o desgaste que ocorre em deslizamento alternativo sem lubrificação.

Assim, a caracterização efectuada no âmbito desta dissertação permitiu as seguintes conclusões:

1. Os resultados actuais indicam que as soluções utilizadas actualmente pela SRAMPort revelaram uma elevada performance.
2. Em condições de ambiente fechado e limpo, os revestimentos do tipo WC/C apresentam propriedades lubrificantes bastante encorajadores para futuros desenvolvimentos, como a alta competição.
3. O revestimento duro, CrAlZr(N), apresenta propriedades de resistência ao desgaste promissoras, no entanto, as condições de adesão ainda não estão completamente optimizadas. Aconselha-se um estudo da fiabilidade do processo de revestimento e uma melhor caracterização deste tipo de materiais. A aplicação deste revestimento duro permite óptimas expectativas e poderá ser considerado como alternativa ao Delta.

6. BIBLIOGRAFIA

2002. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. s.l.: ASTM, 2002. Vols. G 133 – 95 (2002).
2004. Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed-Cylinder Apparatus. s.l.: ASTM, 2004. Vols. G 83 – 96 (2004).
- Archard, J. F. 1953. Contact and Rubbing of Flat Surface. 1953.
- Ashby, Michael F., 1992. Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth - Heinemann, 2005. 3rd edition.
- Bhushan, Bharat. (2001). Modern Tribology Handbook, Volume One, Principles of Tribology. CRC Press LLC.
- Braga, D., A. Ramalho, P.N. Silva, A. Cavaleiro. (2006). “Study of abrasion resistance of steels by micro-scale tests”. Materials Science Forum III (2006) 544-548.
- Callister, William D., Jr. (2007). Materials Science and Engineering - An Introduction. 7th edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Chandler, Harry. (1995). Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. s.l.: ASTM, 1995 (pp. 642 – 646).
- Czichos, H. and Habig, K. 1992. Tribology Handbook Friction and Wear. German: s.n., 1992.
- Davis, Joseph R. 1995. ASM Specialty Handbook: Tool Materials. s.l.: ASM International. Handbook Committee.
- Figueiredo, Luís (2009). Comparação do desgaste de correntes de bicicleta em condições de serviço e em laboratório. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- Haimbaugh, Richard E. 2001. Practical induction heat treating. ASM International. Handbook Committee, 1st edition.
- Holmberg, Kenneth., Matthews, Allan. 1994. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering. Elsevier. 2009, 2nd edition. (pp. 367 – 371).
- Julião, Jorge Manuel Soares. 1998. Projecto de transmissões por correntes de rolos com base nas curvas de alongamento. Coimbra: s.n., 1998.
- Krushov, M. M. (1974). Principles of abrasive wear. In Wear (pp. 69 - 88).
- Luo, D.B., Fridrici, V., Kapsa, Ph. 2009. Selecting solid lubricant coatings under fretting conditions. Wear; Volume 268, 8 December 2010, Pages 816–827.
- M. A. M., & Swanson, P. A. (1983). The effect of abrasive particle shape on abrasive wear: a comparison of theory and experiment. In K. C. Ludema, Wear of Materials. New York: ASME.
- Mulhearn, T. O., & Samuels, L. E. (1962). The abrasion of metals: a model of the process.

-
- Rabinowicz, Ernest (1995); *Friction and Wear of Materials*; John Wiley & Sons; 2nd edition.
- Rabinowicz, Ernest. (1965). *Friction and wear of materials*. John Wiley, 1965.
- Ramalho, A. 2010. A reliability model for friction and wear experimental data. *Wear*; Volume 269, Issues 3-4, 18 June 2010, Pages 213-223.
- Ramalho, A. and Miranda, J. C. 2005. The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. Elsevier. 2005, Vols. 260 (2006) 361–367, wear.
- Ramalho, Amílcar Lopes. 1994. *Comportamento tribológico de filmes finos de W-Co-C*. Coimbra: s.n., 1994.
- Simões, Gustavo (2010). *Comportamento ao Desgaste de Correntes de transmissão para bicicleta: Efeito do material do pino no alongamento da corrente*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- Singer, I.L. and Pollock, H.M. (1992). *Fundamentals of friction: Macroscopic and Microscopic Processes*. Kluwer Academic Publishers.
- Sutherland, Howard. (2005). *Sutherland's Handbook for Bicycle Mechanics*. 7th edition. Sutherland's Bicycle Shop Aids, Inc., 2005.
- Trezona, R.I., Allsopp, D. N. and Hutchings, I. M. 1999. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. Elsevier. 1999, Vols. 225–229 (1999) 205–214, wear.
- Wikipedia. 2011. [Online] 27 Novembro de 2004. Acedido 22 de Maio de 2011, em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Bicicleta>.
- Zum-Ghar, K. H. 1987. *Microstructure and wear of materials*. s.l.: Elsevier, 1987.

7. ANEXO I

7.1. Tribómetro para ensaios de desgaste.

O equipamento usado nos ensaios de desgaste, tendo sido construído no Departamento de Engenharia Mecânica, tem como base um torno mecânico que permite o suporte do veio de contra prova nas duas extremidades para uma melhor precisão, Figura 39. O controlo da velocidade de rotação é aplicado por um variador de frequência de rotação.



Figura 39 – Tribómetro para ensaios abrasivos.

Com o auxílio de um suporte vertical acoplado ao torno onde uma rótula permite a rotação do suporte dos provetes, que se encontra nivelado. Os provetes são colocados no limiar do contacto com o cilindro de contra prova, sem esforço aplicado. A carga é aplicada através de massas calibradas e a força exercida na vertical será transferida para o sistema através da rótula.

A montagem e os ensaios seguem as recomendações da norma ASTM G 83 – 96 (2004).

7.2. Tribómetro para ensaios de escorregamento

O equipamento tribológico aplicado em ensaios de escorregamento alternativos tem como base o mesmo torno mecânico anteriormente descrito para testes de abrasão.

Esta consiste num contacto de cilindros cruzados, em que o cilindro de contra prova se encontra em repouso e o eixo a ensaiar desloca-se com um movimento linear paralelo ao cilindro em repouso, sendo que a amplitude de movimento é de 1,025 mm. Este movimento é aplicado por um rolamento e um veio excêntrico, acoplado a um torno, que roda a 150 rpm, 35,2 rad/s. A força normal é aplicada através de um sistema de mola e porca, e é determinada com elevada precisão através de uma célula de carga e um sistema de medição de uma balança. A força de atrito entre os dois corpos em contacto é medida por uma célula de carga e uma placa de aquisição de dados ligada a um computador. O sistema que permite a célula de carga medir a força de atrito é composto por uma calha de rolamentos na base do suporte do cilindro de contra prova. Assim permite o deslocamento na direcção do movimento do eixo a ensaiar, e como a célula de carga se encontra imóvel, a força que o eixo a ensaiar exerce sobre o cilindro de contra prova (força de atrito) é registada pela mesma, Figura 40.

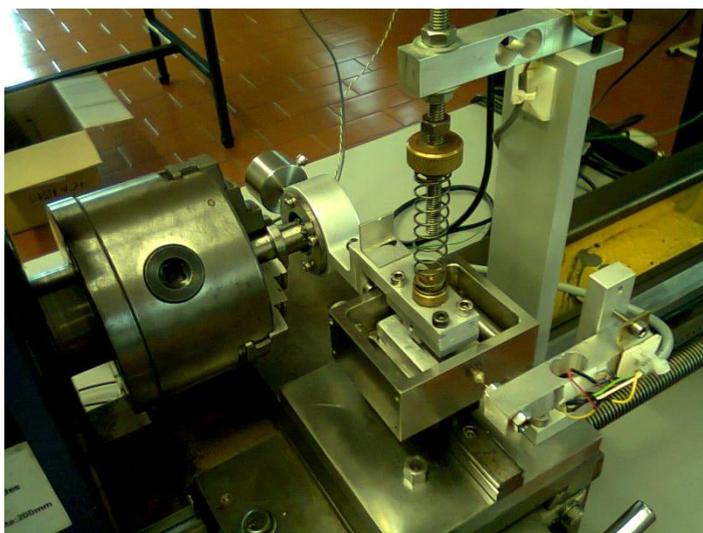


Figura 40 – Montagem para ensaios de escorregamento.

O equipamento segue a norma ASTM G133 – 95. (2002).

7.3. Microscópios ópticos

As medições das zonas de desgaste em ensaios de abrasão foram tomadas por microscópio óptico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes*, Figura 41, com ampliação de 15x e iluminação fluorescente. Este possui um *Microstage*, um sistema de posicionamento do prato de medição, que comporta dois micrómetros digitais, um em cada direcção XY (dois graus de liberdade), com precisão de 0,001 mm.



Figura 41 – Microscópio óptico *Mitutoyo*.

Para efectuar as medições nos ensaios de escorregamento foi utilizado um microscópio óptico *Nikon Stereo Photo SMZ – 10* com uma máquina fotográfica *Cannon PowerShot A620*. A iluminação é adicionada por fibra óptica através de um equipamento *VOLPI Intralux 500*, Figura 42.



Figura 42 – Microscópio óptico *Nikon*.

7.4. Microscópio electrónico de varrimento



Figura 43 – Microscópio electrónico de varrimento.

A análise da morfologia dos revestimentos e dos mecanismos de desgaste nos mesmos foram analisados com recurso a um microscópio electrónico de varrimento, *Philips® XL30 TMP*, Figura 43. Possui uma resolução máxima de $3,5 \times 10^{-9}$ m, e análise por espectrometria de dispersão de energia (*EDS*) *EDAX – Genesis XM2*.

7.5. Medição de dureza

As medições de algumas durezas foram tomadas com o auxílio de um medidor de durezas ou Durómetro da marca *Struers Duramin*, Figura 44. Possui uma resolução máxima de $0,01 \mu\text{m}$, efectua medições em Vickers, Knoop, Brinell e Rockwell. Efectua medições de micro e macro – dureza, com intervalo de carga aplicada de 10 – 2000 gf, um período de medição de 15 segundos, sistema automático de intercâmbio de cargas. O posicionamento das amostras é controlado por uma mesa de medição micrométrica com dois graus de liberdade.



Figura 44 – Durómetro.

7.6. Medição de rugosidade

Todas as medições de rugosidade foram determinadas através de um medidor de rugosidade portátil da marca *Mitutoyo*, modelo *Surftest- SJ-500/P Series 178*, Figura 45. Possui uma distância de medição de 50 mm, a escala varia entre 800 μ m, 80 μ m e 8 μ m e possui um controlador ligado a um computador com a respectiva interface. Esta unidade permite a medição em componentes com dimensões muito reduzidas.



Figura 45 – Medidor de rugosidade portátil.