**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

RONALDO CÂMARA COZZA

**Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-
abrasivos por esfera rotativa fixa em condições
de força normal constante e pressão constante**

São Paulo
2011

RONALDO CÂMARA COZZA

Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

São Paulo
2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do Autor e com a anuência de seu Orientador.

São Paulo, 25 de Julho de 2011.

Ronaldo Câmara Cozza

Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

FICHA CATALOGRÁFICA

Cozza, Ronaldo Câmara

Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante / R.C. Cozza. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011. 290 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Desgaste 2.Desgaste micro-abrasivo 3.Desgaste abrasivo por riscamento 4.Desgaste abrasivo por rolamento 5.Coefficiente de atrito 6.Pressão 7.Ball-cratering. I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RELATÓRIO DE DEFESA

Aluno: 3151 - 4982104 - 3 / Página 1 de 1

Relatório de defesa pública de Tese do(a) Senhor(a) Ronaldo Câmara Cozza no Programa: Engenharia Mecânica, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 01 dias do mês de junho de 2011, no(a) realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Ronaldo Câmara Cozza, apresentada para a obtenção do título de Doutor intitulado:

"Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Roberto Martins de Souza	Presidente	EP - USP	<u>APROVADO</u>
Deniol Katsuki Tanaka	Titular	EP - USP	<u>APROVADO</u>
Jose Daniel Biasoli de Mello	Titular	UFU - Externo	<u>APROVADO</u>
Amilton Sinatora	Titular	EP - USP	<u>APROVADO</u>
Geralda Cristina Durães de Godoy	Titular	UFMG - Externo	<u>APROVADO</u>

Resultado Final: APROVADO

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Elias Alves de Almeida _____, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 01 dias do mês de junho de 2011.

Deniol Katsuki Tanaka

Amilton Sinatora

Jose Daniel Biasoli de Mello

Geralda Cristina Durães de Godoy

Roberto Martins de Souza
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em _____ e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Doutor em Ciências obtido no Programa Engenharia Mecânica - Área de concentração: Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho às três pessoas de fundamental importância em minha formação pessoal, profissional e responsáveis por eu ter chegado até aqui: minha avó, **Rosa Lázaro Dias Câmara**, meu avô, **Manoel França e Câmara** e minha mãe, **Geni França e Câmara**.

AGRADECIMENTOS

Aos **Professores** da “**Escola Estadual Profª Pedra de Carvalho**”, pela formação do 1º. e 2º. graus e incentivo na continuação dos estudos.

Aos **Professores** das escolas **SENAI Almirante Tamandaré** e **SENAI Mario Amato**, pela amizade, formação profissional, incentivo na continuação dos estudos e rigor na disciplina.

Aos **Professores** da **FEI – Faculdade de Engenharia Industrial**, pela formação e incentivo ao início da Pós-Graduação.

Aos **Professores** da **UMESP – Universidade Metodista de São Paulo**, pela formação e incentivo ao início da Pós-Graduação.

Ao **Professor Roberto Martins de Souza**, por sua essencial importância ao longo deste caminho, pela valiosa amizade, conhecimentos transmitidos, por toda ajuda, orientação e constante preocupação com o andamento do trabalho.

Aos **Professores Deniol Katsuki Tanaka** e **Amilton Sinatora**, pela valiosa amizade, pelos conhecimentos transmitidos, por toda ajuda e atenção.

Ao **Professor José Daniel Biasoli de Mello – Universidade Federal de Uberlândia**, pelas discussões, ajuda e, principalmente, pela valiosa amizade.

À **Professora Geralda Cristina Durães de Godoy – Universidade Federal de Minas Gerais**, pelos conselhos e valiosa contribuição no fechamento deste trabalho.

A todos os **Professores** e **Funcionários** da **USP**, pela convivência, ajuda e amizade.

À **FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo**, por custear o equipamento projetado e construído para a realização deste trabalho.

Ao **CDC – Centro de Desenvolvimento de Cilindros**, pela Bolsa concedida junto à empresa **Aços Villares S.A.**.

À **Professora Alessandra Fernandes dos Santos**, por sua participação fundamental na minha carreira profissional mas, principalmente, pela extraordinária amizade.

Ao **Professor Silvio Tado Zanetic**, pela oportunidade dada ao início de minha carreira acadêmica, confiança depositada e, principalmente, pela amizade, conselhos transmitidos e incondicional apoio dado ao longo desses anos.

A todos os **Professores** e **Funcionários** da **FATEC-Mauá**, pela convivência, ajuda e amizade.

Ao **CEETPS – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”**, pelo “início de tudo”.

À **Reitoria do Centro Universitário da FEI**, pela oportunidade e confiança.

Ao **Professor Luiz Valdir Bonassi**, pela confiança, dedicação em projetar-me como Professor no **Centro Universitário da FEI**, pelos conselhos, valiosa amizade e, acima de tudo, pela admiração adquirida por mim, como “Aluno” e “Professor”.

Ao **Professor Roberto Bortolussi**, pela confiança e valiosa amizade.

Aos **Professores Augusto Martins dos Santos e Fernando Aurélio Flandoli**, pela valiosa amizade e, principalmente, por mostrar o quão profissionais são, mantendo, sempre, a humildade.

Aos **Professores José Luiz de Oliveira e Luiz Fiorani**, pela confiança e valiosa amizade.

A todos os **Professores e Funcionários do Centro Universitário da FEI**, pela convivência, ajuda e amizade.

Ao **Professor José Carlos Bressiani**, do **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN**, pela atenção.

Ao **Professor Ian M. Hutchings – Universidade de Cambridge – ING**, pelas breves, mas, proveitosas discussões.

Ao **Professor Amílcar Lopes Ramalho – Universidade de Coimbra – POR**, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao amigo **Humberto Zambetti da Silva**, pelos conselhos.

Aos amigos “**Karluz**”, **Norberto Polido, Marina Polido, Caren, Wolnei, Hector, Erick, Valter, Mateus, Rogério, Marcel, Éric, Daniella, Denis, Bernardete e Bárbara**, pessoas que nos ensinam a tentar sempre “sermos melhores a cada dia”.

À **minha família**, sempre presente...

A **Deus**, por tudo que sou...

Cada dia, nova etapa de trabalho é iniciada!

Lembre-se de agradecer ao Pai o ensejo do repouso que lhe concedeu, e prepare-se para executar as tarefas, de que está encarregado, com alegria e boa vontade.

Agradeça, também, o trabalho que lhe proporciona o pão de cada dia, e procure executá-lo da melhor forma de que for capaz.

O trabalho bem executado traz-nos a alegria do dever cumprido.

Carlos Torres Pastorino

Resumo

O ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa vem conquistando elevada aceitação em universidades e centros de pesquisa, sendo amplamente adotado em estudos envolvendo desgaste abrasivo de materiais. Dois modos de desgaste abrasivo podem ser observados neste tipo de ensaio: “rolamento” resulta quando as partículas abrasivas rolam sobre a superfície do corpo-de-prova, enquanto “riscamento” é observado quando as partículas abrasivas deslizam sobre o mesmo; o tipo do modo de desgaste abrasivo apresenta uma significativa influência sobre o comportamento de um sistema tribológico. Diversos trabalhos envolvendo coeficiente de atrito durante ensaios de desgaste abrasivo estão disponíveis na literatura, mas somente uma pequena parcela dedicaram-se ao estudo do coeficiente de atrito desenvolvido em ensaios de desgaste micro-abrasivo conduzidos por esfera rotativa. Adicionalmente, pesquisas preliminares reportaram que os resultados são dependentes da variação de pressão, ocasionada pela condução de ensaios sob condições de “força normal constante”. Logo, o propósito desta Tese de Doutorado é pesquisar a relação entre coeficiente de atrito e modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, em condições de “força normal constante” e “pressão constante”. Ensaios “ball-cratering” foram conduzidos com esferas de aço AISI 52100 e um corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI H10. A pasta abrasiva foi preparada com partículas de carbeto de silício (SiC) preto (tamanho médio de partícula de 3 μm) e água destilada. Diferentes valores de “força normal constante” e “pressão constante” foram definidos para os experimentos. As forças “normal” (N) e “tangencial” (T) foram monitoradas continuamente durante os ensaios e a relação entre T/N foi calculada para fornecer uma indicação do coeficiente de atrito atuante no sistema tribológico “esfera / partículas abrasivas / corpo-de-prova”. Em todos os casos, análises por Microscopia Óptica das crateras de desgaste revelaram somente a presença de desgaste abrasivo por “riscamento”. Entretanto, observações mais detalhadas, conduzidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, indicaram que diferentes níveis de desgaste abrasivo por “rolamento” atuaram ao longo dos riscos, fenômeno nomeado de “micro-rolling abrasion” (“micro-rolamento”). Além disso, os resultados obtidos mostraram, também, que: *i*) a distância de deslizamento apresenta significativa influência sobre a transição entre os modos de desgaste abrasivo, *ii*) para os valores de “força normal constante” e “pressão constante” adotados, o coeficiente de atrito manteve-se, aproximadamente, na mesma faixa de valores e *iii*) o coeficiente de atrito é independente da taxa de desgaste.

Palavras-chave: Desgaste, desgaste micro-abrasivo, desgaste abrasivo por riscamento, desgaste abrasivo por rolamento, coeficiente de atrito, pressão, ball-cratering.

Abstract

The micro-scale abrasive wear test by rotative ball has gained large acceptance in universities and research centers, being widely used in studies on the abrasive wear of materials. Two wear modes are usually observed in this type of test: “rolling abrasion” results when the abrasive particles roll on the surface of the tested specimen, while “grooving abrasion” is observed when the abrasive particles slide; the type of wear mode has a significant effect on the overall behaviour of a tribological system. Several works on the friction coefficient during abrasive wear tests are available in the literature, but only a few were dedicated to the friction coefficient in micro-abrasive wear tests conducted with rotating ball. Additionally, recent works have identified that results may also be affected by the change in contact pressure that occurs when tests are conducted with constant applied force. Thus, the purpose of this work is to study the relationship between friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering wear tests conducted at “constant normal force” and “constant pressure”. Micro-scale abrasive wear tests were conducted with a ball of AISI 52100 steel and a specimen of AISI H10 tool steel. The abrasive slurry was prepared with black silicon carbide (SiC) particles (average particle size of 3 μm) and distilled water. Two constant normal force values and two constant pressure values were selected for the tests. The tangential and normal loads were monitored throughout the tests and their ratio was calculated to provide an indication of the friction coefficient. In all cases, optical microscopy analysis of the worn craters revealed only the presence of grooving abrasion. However, a more detailed analysis conducted by SEM has indicated that different degrees of rolling abrasion have also occurred along the grooves. The results have also shown that: *i*) the sliding distance presents an important role on the wear mode transition, *ii*) for the selected values of “constant normal force” and “constant pressure”, the friction coefficient presented, approximately, the same range of values and *ii*) the friction coefficient was independent of the wear rate.

Keywords: Wear, micro-abrasive wear, grooving abrasion, rolling abrasion, friction coefficient, pressure, ball-cratering.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1 Introdução

Figura 1.1. Princípio do ensaio “dimple grinder” [9,10]._____4

Capítulo 2 Desgaste Micro-Abrasivo

Figura 2.1. Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [12]._____5

Figura 2.2. Equipamentos de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. (a) configuração esfera-livre (foto: cortesia do Prof. Dr. J.D.B. de Mello, UFU – Universidade Federal de Uberlândia); (b) configuração esfera-fixa [23,27]._____6

Figura. 2.3. Imagens de crateras de desgaste: (a) diâmetro – d [64]; (b) profundidade – h (ilustração esquemática); (c) volume – V [45]._____7

Figura 2.4. Princípio do (a) desgaste abrasivo por riscamento e do (b) desgaste abrasivo por rolamento [75,102]._____11

Figura 2.5. Marcas de (a) desgaste abrasivo por riscamento [12] e (b) desgaste abrasivo por rolamento [35], geradas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.____12

Figura 2.6. Desgaste abrasivo misto [22]: atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e desgaste abrasivo por riscamento [12,23]._____12

Figura 2.7. Partículas abrasivas atuando entre a esfera e o corpo-de-prova, em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa (ilustração esquemática; esta figura não configura qualquer tipo de comportamento que as partículas abrasivas podem vir a apresentar durante o processo de desgaste)._____14

Figura 2.8. Gráficos do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio. Indicação da obtenção do Regime Permanente de Desgaste, definido pela estabilização de k . (a) Cortesia do Prof. Dr. J.D.B. de Mello, UFU – Universidade Federal de Uberlândia. (b) Ensaios realizados em um corpo-de-prova revestido com nitreto de titânio – TiN; os termos k_t , k_s e k_c referem-se, respectivamente, ao coeficiente de desgaste total (substrato + revestimento), ao coeficiente de desgaste do substrato e ao coeficiente de desgaste do revestimento [69]._____16

Figura 2.9. Comportamento linear do volume de desgaste em função do tempo de ensaio, denotando a obtenção do Regime Permanente de Desgaste [69]._____18

Figura 2.10. Comportamento não-linear do volume de desgaste, em função de SN (“distância de deslizamento” $\times$ “força normal”) [32]. Resultados obtidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa._____19

- Figura 2.11. Comportamento linear do volume de desgaste em função de SN [61]. Corpo-de-prova: PMMA (polimetacrilato de metila). Força normal: $N = 0,25$ N. Pasta abrasiva composta por 18,9% SiC (tamanho médio de partícula: $4,25 \mu m$) e 81,1% H_2O -Destilada, em volume._____20
- Figura 2.12. Imagens de crateras de desgaste geradas em sistemas revestidos: (a) volume de desgaste total – V_t (substrato + revestimento) (ilustração esquemática) [69]; (b) profundidade total da calota – h e espessura do revestimento – h_c (ilustração esquemática) [69]; (c) diâmetro interno – a e diâmetro externo – b [26,69]._____21
- Figura 2.13. Comportamento da taxa de desgaste em função da variação da força normal, para um revestimento de carbetto de boro, esfera de aço AISI 52100 e partículas abrasivas de SiC [19]._____23
- Figura 2.14. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação da força normal, para revestimentos de PA-11, esferas de aço-carbono e partículas abrasivas de SiC [18]._____23
- Figura 2.15. Comportamento da taxa de desgaste em função da variação da força normal, para revestimentos de PA-11, esferas de aço-carbono e partículas abrasivas de SiC [18]._____24
- Figura 2.16. Diferentes estágios de formação de uma cratera de desgaste, com as respectivas distâncias de deslizamento e revoluções da esfera de ensaio [61]._____26
- Figura 2.17. Variação linear do volume de desgaste em função da distância de deslizamento [35]._____27
- Figura 2.18. Gráficos de $V = f(S)$ obtidos a partir de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa em sistemas revestidos, caracterizando Regime Permanente de Desgaste [125]. *Figura editada.*_____28
- Figura 2.19. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da ascensão da distância de deslizamento. (a) Mesmo corpo-de-prova para diferentes condições de ensaio [19,130]; (b) diferentes corpos-de-prova para condições de ensaio idênticas [19]._____29
- Figura 2.20. Comportamento do volume de desgaste, em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio. Corpo-de-prova de aço-ferramenta e partículas abrasivas de carbetto de silício (Allsopp [131] *apud* Gee *et al.* [43]). *Gráfico editado.*_____32
- Figura 2.21. Comportamento do volume de desgaste, em função da variação da rotação da esfera de ensaio. Revestimento de DLC e partículas abrasivas de diamante (Bethke e Schiffmann [132] *apud* Gee *et al.* [43])._____32
- Figura 2.22. (a) Comportamento do coeficiente de desgaste, em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio [17]. Incrustação de partículas abrasivas para diferentes valores de v : (b) $0,12$ m/s; (c) $0,13$ m/s; (d) $0,143$ m/s [17]. $N = 6$ N e $S = 100$ m._____33
- Figura 2.23. Volume de desgaste em função da porcentagem, em volume, de SiC. Ensaios realizados com esferas de aço para rolamento e corpos-de-prova de aço-ferramenta, sob cargas normais de $0,25$ N, $0,5$ N e 1 N [35]._____35
- Figura 2.24. Valores de k para revestimentos de TiN, depositados sobre substratos de aço-ferramenta ASP 23 e liga de titânio Ti(Al,Mo), para diferentes pastas abrasivas e força normal de $0,2$ N. Medições realizadas por microscopia óptica e perfilometria a laser [135]._____36

Figura 2.25. Coeficientes de desgaste obtidos com as pastas abrasivas “20% SiC – 80% H ₂ O deionizada” e “20% SiC – 80% glicerina”. Substrato: aço-ferramenta ASP 23 [135]. <i>Figura editada.</i>	37
Figura 2.26. Valores de k em função do tipo de composto abrasivo: (a) “20% SiC – 80% H ₂ O deionizada”; (b) “10% Al ₂ O ₃ – 90% H ₂ O deionizada”; (c) “20% Al ₂ O ₃ – 80% glicerina” [135]. <i>Figuras editadas.</i>	38
Figura 2.27. Valores de k em função do tipo de material abrasivo (SiC e Al ₂ O ₃); 80% de glicerina em ambos os casos [135]. <i>Figura editada.</i>	39
Figura 2.28. Partículas abrasivas: (a) SiC – forma “angular” [12]; (b) vidro – forma “esférica” [49].	40
Figura 2.29. Relação esquemática entre a taxa de desgaste e o quociente H_A/H_S . <i>Figura adaptada.</i>	41
Figura 2.30. Volume de desgaste em função do produto da distância de deslizamento pela força normal, para as formas “faceted” ($D_p = 14,62 \mu\text{m}$) e “blocky” ($D_p = 15,7 \mu\text{m}$) das partículas abrasivas [64]. <i>Figura editada.</i>	42
Figura 2.31. Variação da taxa de desgaste em função do tamanho das partículas abrasivas; superfícies de cobre e partículas abrasivas de SiC [98]. <i>Gráfico editado.</i>	43
Figura 2.32. Partículas abrasivas utilizadas por Imbeni <i>et al.</i> [80]: (a) “SiC – 20”; (b) “Al ₂ O ₃ – 20”; (c) “Al ₂ O ₃ – 50”. Denominações conforme Tabela 2.1.	45
Figura 2.33. Microestrutura da liga com memória de forma NiTi, à temperatura ambiente [80].	45
Figura 2.34. Valores de k em função do tipo de partícula abrasiva [80]. <i>Figura editada.</i>	46
Figura 2.35. Comparação entre os valores de k para as partículas abrasivas (a) “SiC – 4” e “SiC – 20”, (b) “SiC – 20” e “Al ₂ O ₃ – 20” e (c) “Al ₂ O ₃ – 20” e “Al ₂ O ₃ – 50” [80]. <i>Figuras editadas.</i>	47
Figura 2.36. Transição entre os modos de desgaste abrasivo, em função da concentração da pasta abrasiva e da força normal. Corpos-de-prova de aço-ferramenta, esferas de aço para rolamento e partículas abrasivas de (a) SiC ($D_p = 4,25 \mu\text{m}$), (b) Al ₂ O ₃ ($D_p = 4,97 \mu\text{m}$) e (c) diamante ($D_p = 3,05 \mu\text{m}$) [35]. Em todos os compostos abrasivos, foi utilizada água destilada [35].	49
Figura 2.37. Transição dos modos de desgaste abrasivo pela variação da (a) concentração da pasta abrasiva (N constante) [134] e (b) força normal (C constante) [50].	50
Figura 2.38. Atuações dos modos de desgaste abrasivo, em função da severidade de contato e da razão H_S/H_E [13,50].	51
Figura 2.39. (a) Princípio do fenômeno “ridging” [39]; (b) “ridges” formados na cratera de desgaste [43].	53
Figura 2.40. (a) Atuação de “ridging” em uma cratera de desgaste; (b) corte na secção transversal de um “ridge”; (c) desgaste abrasivo por rolamento nas regiões adjacentes ao “ridge”; (d) final de um “ridge”, na borda da cratera de desgaste. As imagens (b), (c) e (d) referem-se à cratera de desgaste (a) [56].	54

Figura 2.41. (a) Perfil da cratera de desgaste exibida na Figura 2.40a; (b) caminhos percorridos pelas partículas abrasivas; (c) contato entre a esfera e o corpo-de-prova [56].	55
Figura 2.42. Comportamento da taxa de desgaste, em função da força normal. Os pontos denotados com “r” indicam ocorrência de “ridging” [56].	56
Figura 2.43. Comportamento da taxa de desgaste, em função da concentração da pasta abrasiva. Os pontos denotados com “r” indicam ocorrência de “ridging” [56].	56
Figura 2.44. Interação entre força normal e concentração da pasta abrasiva na formação de “ridge” [56].	57
Figura 2.45. (a) Cratera de desgaste com ocorrência de “pile-up”; (b) perfil da cratera de desgaste (a) [135].	58
Figura 2.46. Atuação de “scuffing” [43].	59
Figura 2.47. Ocorrência de “scuffing”. Definição dos diâmetros “ d ” e “ d_s ” [61]. A linha branca traçada na cratera de desgaste representa o plano de corte utilizado na análise de seu perfil.	59
Figura 2.48. Partícula abrasiva formatada por Williams e Hyncica [13,168,169].	61
Figura 2.49. Atuação de uma partícula abrasiva de diâmetro D_p submetida à ΔN [13].	63
Figura 2.50. (a) Exemplificação das grandezas b_1 e r_{Hertz} (ensaios realizados com esfera de aço AISI 52100, corpo-de-prova de PMMA, partículas abrasivas de SiC com tamanho médio de 4,3 μm e força normal de 0,2 N); (b) esquematização geométrica de b_1 e r_{Hertz} [13].	65
Figura 2.51. (a) Alinhamento das partículas abrasivas sob desgaste abrasivo por riscamento [46]; (b) distribuição granulométrica das partículas abrasivas de (a) [46].	66
Figura 2.52. Ação de uma partícula abrasiva sobre uma superfície [172].	67
Figura 2.53. Vistas longitudinais, frontais (esquemáticas) e geração dos mecanismos de desgaste abrasivo (a) “ploughing”, (b) “side-fin”, (c) “wedge” e (d) “cutting” [187,189].	68
Figura 2.54. Definição das áreas A^* e A^{**} [190].	69
Figura 2.55. Comportamento esquemático de μ_e e μ_c .	70
Figura 2.56. Ascensão do coeficiente de atrito em função do incremento da força normal. Corpo-de-prova de aço-carbono AISI 1004 e areia de SiO ₂ – ANB 50 [93]. <i>Figura editada.</i>	73
Figura 2.57. Comportamento de $\mu = f(S)$ para alumínio, prata e cobre [268]. <i>Figura editada.</i>	74
Figura 2.58. Coeficiente de atrito em função de H_A/H_S . Corpos-de-prova de ferro fundido nodular e aço, junto a lixas de vidro e SiC – grãos 80 e 240 [97]. <i>Figura editada.</i>	75
Figura 2.59. Influência das condições de ensaio de “baixa tensão” e “alta tensão” sobre o coeficiente de atrito [250]. Os termos “angular” e “rounded” referem-se às formas das partículas abrasivas (tomar como referência a Figura 2.28).	76
Figura 2.60. Ângulo α , para uma partícula abrasiva de formato cônico [146].	77

Figura 2.61. Comportamento de $\mu = f(D_p)$ para corpos-de-prova de aço AISI 1095 e lixas de SiC [146]. *Figura editada.*.....77

Figura 2.62. Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Resultados obtidos em um equipamento de configuração “esfera-livre” [29]......78

Capítulo 3

Objetivos – Materiais e Métodos

Figura 3.1. Equipamentos de configurações (a) “esfera-fixa” [22] e (b) “esfera livre” [45], utilizados nas Pesquisas Iniciais.82

Figura 3.2. Composição química nominal e microestrutura do aço-ferramenta AISI M2, na condição “temperado e revenido” [22,23].83

Figura 3.3. Composição química nominal e microestrutura do WC-Co P20 [22,23].83

Figura 3.4. Composição química nominal e microestrutura do aço AISI 52100, na condição “temperado e revenido”. Presença de carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz [12,22,23].84

Figura 3.5. (a) Micrografia eletrônica de varredura do SiC [273]; (b) distribuição granulométrica do SiC [273].84

Figura 3.6. Composição química nominal e microestrutura do aço-ferramenta AISI H10, na condição “temperado e revenido”. Matriz martensítica contendo austenita retida [12].89

Figura 3.7. (a) Micrografia eletrônica de varredura do SiC [12]; (b) distribuição granulométrica do SiC [12].89

Figura 3.8. Evolução da pressão em função do tempo de ensaio, sob condições de pressão “constante” e “variável”. Definições de A_{FNC} e A_{PC} [12].92

Capítulo 4

Resultados e Discussão – Pesquisas Iniciais

Figura 4.1. Carbetos de silício sem uso, conforme recebido pela Empresa Minasolo – Comércio e Representações Ltda.102

Figura 4.2. Carbetos de silício após a realização dos ensaios conduzidos sob (a) “força normal constante” e (b) “pressão constante”.102

Figura 4.3. Partículas abrasivas de sílica com ocorrência de “fragmentação” [49].103

Figura 4.4. Comportamento da severidade de ensaio em função do tempo de ensaio. Corpos-de-prova de (a) WC-Co P20 e (b) aço-ferramenta AISI M2. Ensaios conduzidos em equipamentos de configuração “esfera-livre” e “esfera-fixa” [23].105

Figura 4.5. (a) Quociente A_g/A_t em função do tempo de ensaio para ambas configurações de equipamentos e materiais de corpos-de-prova; (b) desgaste abrasivo por rolamento para a condição $A_g/A_t = 0$ e (c) desgaste abrasivo misto (riscamento + rolamento) para a condição $0 < A_g/A_t < 1$. Imagens (b) e (c): corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 para $S = 46,2$ m e $S = 4$ m, respectivamente [23].106

Figura 4.6.	Comportamento do volume de desgaste, em função da evolução da pressão, para ambas configurações de equipamentos e materiais de corpos-de-prova.	108
Figura 4.7.	Cratera de desgaste obtida nos ensaios. (a) “Larger-vision” e (b)-(c)-(d) “lower-vision”, força normal constante de 1,25 N e distância de deslizamento de 25 m. Ocorrência de “micro-rolling abrasion” [12].	110
Figura 4.8.	Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Força normal constante $N_1 = 1,25$ N; (c)-(d) força normal constante $N_2 = 5$ N. Distância de deslizamento $S_6 = 100$ m [12].	111
Figura 4.9.	Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Força normal constante $N_1 = 1,25$ N; (c)-(d) força normal constante $N_2 = 5$ N. Distância de deslizamento $S_1 = 10$ m [12].	111
Figura 4.10.	Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. (a) $N_1 = 1,25$ N; (b) $N_2 = 5$ N [12].	113
Figura 4.11.	Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Pressão constante $P_1 = 1,85$ MPa; (c)-(d) pressão constante $P_2 = 5,13$ MPa. Distância de deslizamento $S = 100$ m [12].	114
Figura 4.12.	Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de pressão constante: $P_1 = 1,85$ MPa e $P_2 = 5,13$ MPa [12].	115
Figura 4.13.	Cratera de desgaste gerada sem a inserção de pasta abrasiva [53].	117
Figura 4.14.	Análises das atuações dos modos de desgaste abrasivo. (a) $N_1 = 1,25$ N e (b) $N_2 = 5$ N (verificações baseadas nos trabalhos de Adachi e Hutchings [13,50]).	118
Figura 4.15.	Análise de Dados Discrepantes. Condições de força normal constante: (a) $N_1 = 1,25$ N e (b) $N_2 = 5$ N.	120

Capítulo 5

Resultados e Discussão – Pesquisas Definitivas

Figura 5.1.	Esfera (a) sem excentricidade e (b) com excentricidade.	121
Figura 5.2.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_1 = 5\%$ SiC – 95% AD – $S_1 = 10$ m.	123
Figura 5.3.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_1 = 5\%$ SiC – 95% AD – $S_2 = 32$ m.	124
Figura 5.4.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_1 = 5\%$ SiC – 95% AD – $S_3 = 100$ m.	125
Figura 5.5.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD – $S_1 = 10$ m.	126
Figura 5.6.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD – $S_2 = 32$ m.	127
Figura 5.7.	Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5$ N – $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD – $S_3 = 100$ m.	128

- Figura 5.8. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_1 = 10 \text{ m}$._____129
- Figura 5.9. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$._____130
- Figura 5.10. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$._____131
- Figura 5.11. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ – $S_1 = 10 \text{ m}$._____132
- Figura 5.12. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$._____133
- Figura 5.13. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$._____134
- Figura 5.14. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ – $S_1 = 10 \text{ m}$._____135
- Figura 5.15. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$._____136
- Figura 5.16. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$._____137
- Figura 5.17. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_1 = 10 \text{ m}$._____138
- Figura 5.18. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$._____139
- Figura 5.19. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$._____140
- Figura 5.20. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____141
- Figura 5.21. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____142
- Figura 5.22. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____143
- Figura 5.23. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_2 = 1,54 \text{ MPa}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____144
- Figura 5.24. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_2 = 1,54 \text{ MPa}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____145
- Figura 5.25. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de ensaio: $P_2 = 1,54 \text{ MPa}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$._____146

Figura 5.26. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	148
Figura 5.27. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25 \text{ N}$ e $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	148
Figura 5.28. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	149
Figura 5.29. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25 \text{ N}$ e $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	149
Figura 5.30. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	150
Figura 5.31. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaio realizado sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25 \text{ N}$ e $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.	150
Figura 5.32. Comportamento do coeficiente de atrito sob condições de desgaste abrasivo por (a) riscamento e (b) rolamento. Tipo de ensaio: “single-particle wear tester” [269]. <i>Figura editada.</i>	151-152
Figura 5.33. Definições das regiões de atuações dos “Comportamento Estável” e “Comportamento Indefinido”.	152
Figura 5.34. Comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os diferentes valores de força normal e concentração de pasta abrasiva.	155
Figura 5.35. Comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os diferentes valores de pressão e concentração de pasta abrasiva.	155
Figura 5.36. Sistemática de medição de λ_{pr} – passo entre riscos.	157
Figura 5.37. Gráfico de $\mu = f(\lambda_{pr})$, para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”.	158
Figura 5.38. Cratera de desgaste gerada sob condição de “força normal constante”.	159
Figura 5.39. Cratera de desgaste gerada sob condição de “pressão constante”.	159
Figura 5.40. Esquematização do princípio de ocorrência do fenômeno “micro-rolling abrasion”.	161
Figura 5.41. Análise qualitativa das atuações dos modos de desgaste abrasivo – condições de “força normal constante” (a partir das Referências [13,50]).	162
Figura 5.42. Variação do volume de desgaste em função da distância de deslizamento, para as condições de ensaio de “força normal constante”. Máximo Desvio-Padrão de V : $0,003 \text{ mm}^3$.	164

Figura 5.43. Variação do volume de desgaste em função da distância de deslizamento, para as condições de ensaio de “pressão constante”. Máximo Desvio-Padrão de V : $0,04 \text{ mm}^3$.	164
Figura 5.44. Comportamento da taxa de desgaste em função da concentração da pasta abrasiva, para as condições de “força normal constante”. Máximo Desvio-Padrão de Q : $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.	166
Figura 5.45. Comportamento da taxa de desgaste em função da concentração da pasta abrasiva, para as condições de “pressão constante”. Máximo Desvio-Padrão de Q : $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.	166
Figura 5.46. Ações de ΔN , ΔT e F_{R-NT} . A partir da Referência [292].	169
Figura 5.47. Esquematização de T , T_{EA} e T_{ACP} [293].	170

Capítulo 6

Conclusões

Figura 6.1. Atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento” e da condição intermediária “micro-rolling abrasion”. (a) “Riscamento” (somente visão macroscópica) [12], (b) “rolamento” (somente) [35], (c) “riscamento + rolamento” (modo-misto) [23] e (d) “micro-rolling abrasion” [12].	172
--	-----

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Desgaste Micro-Abrasivo

Tabela 2.1. Características das partículas abrasivas utilizadas por Imbeni <i>et al.</i> [80].	44
Tabela 2.2. Valores de H_A , H_S e a respectiva classificação do regime de desgaste abrasivo.	46
Tabela 2.3. Classificação qualitativa das influências das grandezas envolvidas na transição entre os modos de desgaste abrasivo.	52
Tabela 2.4. Classificação qualitativa da ação dos mecanismos de desgaste abrasivo.	67
Tabela 2.5. Variação do coeficiente de atrito em função da força normal e materiais de corpos-de-prova e areias [93]. <i>Tabela editada.</i>	73

Capítulo 3

Objetivos – Materiais e Métodos

Tabela 3.1. Objetivos das <i>Pesquisas Iniciais</i> .	81
Tabela 3.2. Concentração da pasta abrasiva [12,22,23].	85
Tabela 3.3. Condições de ensaio definidas para os experimentos realizados com o equipamento de configuração esfera-fixa [22,23].	85
Tabela 3.4. Condições de ensaio definidas para os experimentos realizados com o equipamento de configuração esfera-livre [23].	87
Tabela 3.5. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante [12].	90
Tabela 3.6. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante [12].	91
Tabela 3.7. Tempos de ajuste intermediários definidos para os ensaios realizados sob condições de pressão constante.	93
Tabela 3.8. Objetivos das <i>Pesquisas Definitivas</i> .	95
Tabela 3.9. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante.	97
Tabela 3.10. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante.	98
Tabela 3.11. Tempos de ajuste intermediários definidos para os ensaios realizados sob condições de pressão constante.	98
Tabela 3.12. Durezas dos materiais [12,22,23].	100

Capítulo 5

Resultados e Discussão – Pesquisas Definitivas

Tabela 5.1. Valores de λ_{pr} para as condições de “força normal constante” e “pressão constante” (valores de λ_{pr} em $[\mu\text{m}]$ – em azul)._____158

Tabela 5.2. Taxa de desgaste para as condições de “força normal constante” e “pressão constante” (em azul)._____165

LISTA DE SIGLAS

AACD	Associação de Assistência a Criança Deficiente
AD	Água destilada
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CVD	Chemical Vapor Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond-Like Carbon
DSRW	Dry Sand Rubber Wheel
HSM	High Speed Machine
ICAP	International Conference on Abrasive Processes (Congresso)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ISO	International Organization for Standardization
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
LTM	Laboratório de Tribologia e Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura – Microscópio Óptico de Varredura
MO	Microscopia Óptica – Microscópio Óptico
PA	Poliamida
PBT	Poli(tereftalato de butileno)
PIB	Produto Interno Bruto
PMMA	Poli(metacrilato de metila)
POM	Poli(óxido de metileno)
PP	Polipropileno
RPD	Regime Permanente de Desgaste
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
WOM	Wear of Materials (Congresso)

LISTA DE SÍMBOLOS

“*et alli*” = “*et al.*” (forma utilizada nesta Tese)

Índices.

“*A*” $\Rightarrow$ “partículas abrasivas”

“*CP*” ou “*S*” $\Rightarrow$ “corpo-de-prova”

“*E*” $\Rightarrow$ “esfera”

“*g*” $\Rightarrow$ “grooving”

“*r*” $\Rightarrow$ “rolling”

“*ris*” $\Rightarrow$ “riscamento”

“*rol*” $\Rightarrow$ “rolamento”

“*t*” $\Rightarrow$ “total”

a	Diâmetro interno da cratera de desgaste (substrato) [mm]
A	Área projetada da partícula abrasiva [mm ²]
A_f	Área frontal da partícula abrasiva em contato com o corpo-de-prova [mm ²]
A_{FNC}	Área abaixo da curva de pressão em função do tempo de ensaio, para a condição de força normal constante
$A_g = A_{ris}$	Área projetada com atuação de desgaste abrasivo por riscamento [mm ²]
A_g	Prata
Al	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
A_{PC}	Área abaixo da curva de pressão em função do tempo de ensaio, para a condição de pressão constante
A_{pi}	Área projetada da impressão proveniente do indentador [mm ²]
$A_r = A_{rol}$	Área projetada com atuação de desgaste abrasivo por rolamento [mm ²]
$A_{ris} = A_g$	Área projetada com atuação de desgaste abrasivo por riscamento [mm ²]
$A_{rol} = A_r$	Área projetada com atuação de desgaste abrasivo por rolamento [mm ²]
A_s	Área superficial da cratera de desgaste [mm ²]
A_t	Área projetada total da cratera de desgaste [mm ²]

Au	Ouro
A_1	Área projetada da cratera de desgaste formada por uma rotação da esfera de ensaio [mm ²]
A^*	<i>Grandeza definida na página 69.</i>
A^{**}	<i>Grandeza definida na página 69.</i>
b	Diâmetro externo da cratera de desgaste (revestimento) [mm]
b_1	Diâmetro da cratera de desgaste formada por uma rotação da esfera de ensaio [mm]
B ₁₃ C ₂	Carbeto de boro
C	Concentração da pasta abrasiva
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
d	Diâmetro da cratera de desgaste [mm]
d_s	Diâmetro aparente da cratera de desgaste, que considera o “scuffing” [mm]
D	Diâmetro da esfera de ensaio [mm]
D_C	Tamanho crítico das partículas abrasivas [μm]
D_E	Profundidade de penetração da partícula abrasiva na esfera de ensaio [μm]
D_S	Profundidade de penetração da partícula abrasiva no corpo-de-prova [μm]
D_{ES}	Distância entre superfícies (“esfera – corpo-de-prova”) [μm]
D_P	Tamanho médio das partículas abrasivas [μm]
D_P^M	Diagonal maior da partícula abrasiva [μm] (conforme geometria sugerida por Williams e Hyncica [168])
E	Módulo de Young (Módulo de Elasticidade Longitudinal) [GPa]
F	Forma das partículas abrasivas
F_c	Fator de circularidade (“roundness factor”) (parâmetro relacionado à forma das partículas abrasivas)
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Hematita
F_{R-NT}	Força interativa resultante [N]
$F_{R-normal}$	Força interativa normal [N]
$F_{R-tangencial}$	Força interativa tangencial [N]

h	Profundidade da cratera de desgaste [mm]
h_c	Espessura do revestimento [μm]
H	Dureza [GPa]
H^*	<i>Grandeza definida na página 64.</i>
H_2O	Água
k	Coefficiente de desgaste [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
k_c	Coefficiente de desgaste do revestimento [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
k_s	Coefficiente de desgaste do substrato [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
k_t	Coefficiente de desgaste total (substrato + revestimento) [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
KOH	Hidróxido de potássio
$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	Ferrocianeto de potássio
K_{Ic}	Tenacidade à fratura em tensão plana [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
l_r	Largura do risco [μm]
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
n	Rotação da esfera de ensaio [rpm]
n_p	Quantidade (número) de partículas abrasivas atuantes no sistema tribológico
N	Força normal (“constante”) [N]
ΔN	Força normal efetiva (atuante em uma única partícula abrasiva) [N]
Ni	Níquel
p	Perímetro da área projetada da partícula abrasiva [mm]
P	Pressão (“constante”) [MPa]
Q	Taxa de desgaste [mm^3/m]
r	Denotação para atuação de “ridging”
r_{Hertz}	Raio de contato de Hertz [μm]
R	Raio da esfera de ensaio [mm]
$\mathbf{R}^2$	Coefficiente de Correlação Linear de Pearson
S	Distância de deslizamento [m]
S	Enxofre
S_C	Severidade de contato
S_{ens}	Severidade de ensaio [MPa.m/s]
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício

SiO_2	Sílica
t	Tempo de ensaio [s]; [min]
T	Força tangencial [N]
ΔT	Força tangencial efetiva (atuante em uma única partícula abrasiva) [N]
TaC	Carbeto de tântalo
T_{ACP}	Força tangencial (interação entre as partículas abrasivas e o corpo-de-prova) [N]
T_{EA}	Força tangencial (interação entre a esfera e as partículas abrasivas) [N]
Ti	Titânio
TiC	Carbeto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
v	Velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio [m/s]
V	Volume da cratera de desgaste (volume de desgaste) [mm ³]
V	Vanádio
V_c	Volume de desgaste do revestimento [mm ³]
V_s	Volume de desgaste do substrato [mm ³]
V_t	Volume de desgaste total (substrato + revestimento) [mm ³]
W	Tungstênio
WC	Carbeto de tungstênio
z	Resíduo(s) Padronizado(s)
Zr	Zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

Índices.

“A” $\Rightarrow$ “partículas abrasivas”

“CP” ou “S” $\Rightarrow$ “corpo-de-prova”

“E” $\Rightarrow$ “esfera”

α	Ângulo relacionado à partícula abrasiva (<i>grandeza definida na página 77</i>)
β	Coeficiente de uma Função de 1º. Grau
γ	Coeficiente de uma Função de 1º. Grau
δ	Grau de desgaste (<i>grandeza definida nas páginas 68 e 69</i>)
Θ	Quantidade total de partículas abrasivas sobre a área da cratera de desgaste
λ	Grandeza relacionada à difração de raios-X (Figura 2.33)
λ_{pr}	Passo entre riscos [μm]
μ	Coeficiente de atrito cinético
μ_a	Coeficiente de atrito devido à adesão entre superfícies (partícula abrasiva – corpo-de-prova)
μ_{ACP}	Coeficiente de atrito entre as partículas abrasivas e o corpo-de-prova
μ_c	Coeficiente de atrito “cinético”
μ_e	Coeficiente de atrito “estático”
μ_{EA}	Coeficiente de atrito entre a esfera de ensaio e as partículas abrasivas
μ_{ef}	Coeficiente de atrito “efetivo” (relacionado a cada partícula abrasiva)
μ_{inf}	Valor da linha de tendência inferior do coeficiente de atrito para $t_6 = 2.000$ s
μ_p	Coeficiente de atrito devido ao “ploughing”
μ_{sup}	Valor da linha de tendência superior do coeficiente de atrito para $t_6 = 2.000$ s
ν	Coeficiente de Poisson
Ξ	Nível de atuação de “micro-rolling abrasion” (“micro-rolamento”)
ξ	Severidade do desgaste
σ_c	Tensão crítica [MPa]
τ_s	Tensão de cisalhamento do corpo-de-prova [MPa]

φ	Coeficiente angular da reta (Função de 1º. Grau)
χ	Ângulo relacionado à partícula abrasiva idealizada por Williams e Hyncica [168,169] (<i>grandeza definida na página 61</i>)
Ω	Nível de significância
ϑ	Porcentagem, em volume, de material abrasivo na pasta abrasiva

LISTA DE EQUAÇÕES

Capítulo 2

Desgaste Micro-Abrasivo

$$h \cong \frac{d^2}{8R} \quad \text{para } d \ll R$$

Equação 2.1a _____7

$$V \cong \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d \ll R$$

Equação 2.1b _____7

$$h = 12,70 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2}$$

Equação 2.1c _____8

$$V = \pi \left(12,70h^2 - \frac{h^3}{3} \right)$$

Equação 2.1d _____8

$$V \cong \pi R h^2 \quad \text{para } h \ll R$$

Equação 2.2 _____9

$$Q = \xi \frac{N}{H}$$

Equação 2.3 _____14

$$Q = k.N$$

Equação 2.4 _____14

$$k = \frac{V}{N.S}$$

Equação 2.5 _____15

$$k = \frac{d^4}{128N.R^2.t.n}$$

Equação 2.6 _____15

$$Q = \frac{V}{S}$$

Equação 2.7 _____15

$$V_c = \frac{\pi}{64R}(b^2 - a^2) \quad \text{Equação 2.8} \quad \text{_____}20$$

$$V = QS \quad \text{Equação 2.9a} \quad \text{_____}27$$

$$V = kNS \quad \text{Equação 2.9b} \quad \text{_____}27$$

$$Q = \frac{V_2 - V_1}{S_2 - S_1} \quad \text{Equação 2.10} \quad \text{_____}28$$

$$Q = \frac{dV}{dS} \quad \text{Equação 2.11} \quad \text{_____}28$$

$$Q = \tan(\varphi) \quad \text{Equação 2.12} \quad \text{_____}28$$

$$k = \frac{1}{N}Q \quad \text{Equação 2.13} \quad \text{_____}30$$

$$k = \frac{1}{N} \left(\frac{V_2 - V_1}{S_2 - S_1} \right) \quad \text{Equação 2.14} \quad \text{_____}30$$

$$k = \frac{1}{N} \frac{dV}{dS} \quad \text{Equação 2.15} \quad \text{_____}31$$

$$k = \frac{1}{N} \tan(\varphi) \quad \text{Equação 2.16} \quad \text{_____}31$$

$$F = 4\pi \frac{A}{p^2} \quad \text{Equação 2.17} \quad \text{_____}45$$

$$S_C = \frac{N \left(\frac{1}{H_S} + \frac{1}{H_E} \right)}{\pi \nu^3 \sqrt{\left[0,75NR \left(\frac{1-\nu_S^2}{E_S} + \frac{1-\nu_E^2}{E_E} \right) \right]^2 + 2RD_P}} \quad \text{Equação 2.18} \quad \text{_____}51$$

$$d = \frac{d_s - 0,1407}{0,9358} \quad \text{para } 0,5 \text{ mm} \leq d_s \leq 2,193 \text{ mm} \quad \text{Equação 2.19} \quad \underline{\hspace{2cm}} 60$$

$$d = d_s \quad \text{para } d_s > 2,193 \text{ mm} \quad \text{Equação 2.20} \quad \underline{\hspace{2cm}} 60$$

$$A_f = \frac{\pi D_p D_s}{2} \quad \text{Equação 2.21} \quad \underline{\hspace{2cm}} 63$$

$$D_s = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_p H_s} \quad \text{Equação 2.22} \quad \underline{\hspace{2cm}} 63$$

$$D_E = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_p H_E} \quad \text{Equação 2.23} \quad \underline{\hspace{2cm}} 63$$

$$D_{ES} = D_p - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_p H_s} - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_p H_E} \quad \text{Equação 2.24} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$D_{ES} = D_p - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_p H^*} \quad \text{Equação 2.25} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$\Theta = \frac{A_1 \vartheta}{\pi D_p^2} \quad \text{Equação 2.26} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$\Delta N = \frac{\pi N D_p^2}{A_1 \vartheta} \quad \text{Equação 2.27} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$D_{ES} = D_p \left(1 - 2 \frac{N}{A_1 \vartheta H^*} \right) \quad \text{Equação 2.28} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$\frac{D_p^M}{D_{ES}} = \frac{1}{1 - 2 \frac{N}{A_1 \vartheta H^*}} \quad \text{Equação 2.29} \quad \underline{\hspace{2cm}} 64$$

$$\delta = \frac{A^* - 2A^{**}}{A^*}$$

Equação 2.30 _____69

$$\mu = \frac{T}{N}$$

Equação 2.31 _____70

$$\mu = \mu_a + \mu_p$$

Equação 2.32 _____76

$$\mu_a = \frac{\tau_s}{\pi H_s} \left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l_r}{D_p} \right)^2} \right]$$

Equação 2.33 _____76

$$\mu_p = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 \sin^{-1} \left(\frac{l_r}{D_p} \right) - \sqrt{\left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 - 1} \right]$$

Equação 2.34 _____76

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left[\tan(\alpha) + \frac{\tau_s}{H_s} \sec(\alpha) \right]$$

Equação 2.35 _____76

Capítulo 3

Objetivos – Materiais e Métodos

$$t = \frac{S}{v}$$

Equação 3.1 _____86

$$v = 2.\pi.n.R$$

Equação 3.2 _____86

$$v = \pi.n.D$$

Equação 3.3 _____86

$$t = \frac{S}{\pi.n.D}$$

Equação 3.4 _____86

$$P = \frac{N}{A_t} \quad \text{Equação 3.5} \quad \text{_____} 91$$

$$A_{FNC} = \int_{t_1}^{t_6} P(t) dt \quad \text{Equação 3.6} \quad \text{_____} 91$$

$$A_{PC} = P(t_6 - t_1) \quad \text{Equação 3.7} \quad \text{_____} 92$$

$$P = \frac{\int_{t_1}^{t_6} P(t) dt}{t_6 - t_1} \quad \text{Equação 3.8} \quad \text{_____} 92$$

Capítulo 4

Resultados e Discussão – Pesquisas Iniciais

$$S_{ens} = P v \quad \text{Equação 4.1} \quad \text{_____} 104$$

$$P = \frac{N}{A_t} \quad \text{Equação 4.2} \quad \text{_____} 104$$

Capítulo 5

Resultados e Discussão – Pesquisas Definitivas

$$T = T_{EA} + T_{ACP} \quad \text{Equação 5.1} \quad \text{_____} 170$$

$$\mu = \mu_{EA} + \mu_{ACP} \quad \text{Equação 5.2} \quad \text{_____} 170$$

SUMÁRIO

Capítulo 1	
Introdução	1
1.1. Definição de Tribologia	1
1.2. Importância da ciência “Tribologia”	1
1.3. Ensaios de desgaste abrasivo – síntese histórica	3
1.4. Estruturação da pesquisa	4
Capítulo 2	
Desgaste Micro-Abrasivo	5
2.1. Ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa	5
2.2. Desgaste micro-abrasivo: definição – classificação – terminologia	9
2.2.1. Definição: distinção entre “desgaste abrasivo” e “desgaste micro-abrasivo”	9
2.2.2. Classificação: modos de desgaste abrasivo	11
2.2.3. Terminologia	13
2.3. Equação de Archard para o desgaste abrasivo	14
2.4. Regime Permanente de Desgaste – RPD	15
2.5. Parâmetros de ensaio	21
2.5.1. Força normal	22
2.5.2. Distância de deslizamento	25
2.5.3. Rotação da esfera de ensaio	31
2.5.4. Concentração e tipo da pasta abrasiva	34
2.5.5. Influência das características “dureza”, “forma” e “tamanho” das partículas abrasivas sobre o comportamento ao desgaste	40
2.6. Fenômenos envolvidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa	48

2.6.1. Transição entre os modos de desgaste abrasivo	48
2.6.2. “Ridging”	52
2.6.3. “Pile-up”	58
2.6.4. “Scuffing”	59
2.7. Embasamento conceitual sobre a movimentação das partículas abrasivas	60
2.8. Mecanismos de desgaste abrasivo	66
2.9. Coeficiente de atrito	70
2.9.1. Definições	70
2.9.2. Leis do Atrito	71
2.9.3. Parâmetros de influência sobre o coeficiente de atrito	71
2.9.3.1. Influência da força normal sobre o coeficiente de atrito	72
2.9.3.2. Influência da distância de deslizamento sobre o coeficiente de atrito	73
2.9.3.3. Influência das características “dureza”, “forma” e “tamanho” das partículas abrasivas sobre o coeficiente de atrito	74
2.9.4. Considerações sobre a determinação do coeficiente de atrito em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa	78

Capítulo 3

Objetivos – Materiais e Métodos 80

3.1. Pesquisas Iniciais	81
3.1.1. Objetivos	81
3.1.2. Pesquisa 1 – Força Normal Constante	82
3.1.2.1. Materiais	82
3.1.2.2. Procedimento experimental	85
3.1.3. Pesquisa 2 – Força Normal Constante + Pressão Constante	88
3.1.3.1. Materiais	88
3.1.3.2. Procedimento experimental	90
3.1.3.3. Aquisição de dados e análises de resultados	93

3.2. Pesquisas Definitivas	94
3.2.1. Objetivos	95
3.2.2. Materiais	96
3.2.3. Procedimento Experimental	96
3.2.3.1. Ensaios conduzidos sob força normal constante – pressão variável	96
3.2.3.2. Ensaios conduzidos sob pressão constante	97
3.2.3.3. Aquisição e análise de dados	99
3.3. Durezas dos materiais	100

Capítulo 4

Resultados e Discussão – Pesquisas Iniciais 101

4.1. Fragmentação das partículas abrasivas	101
4.2. Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo	103
4.2.1. Efeito da severidade de ensaio sobre a transição entre os modos de desgaste abrasivo	103
4.2.2. Relação entre volume de desgaste e pressão	107
4.3. Coeficiente de Atrito	109
4.3.1. Condições de Força Normal Constante	109
4.3.2. Condições de Pressão Constante	114
4.3.3. Ocorrência de “ridging”	117
4.3.4. Influência dos modos de desgaste abrasivo sobre o coeficiente de atrito	117
4.4. Considerações estatísticas	119

Capítulo 5

Resultados e Discussão – Pesquisas Definitivas 121

5.1. Importância da anulação da excentricidade da esfera de ensaio	121
5.2. Comportamento do coeficiente de atrito sob condições de “força normal constante” e “pressão constante” – gráficos de $\mu = f(t)$	122

5.3. <i>Análise comparativa estatística do coeficiente de atrito</i>	153
5.3.1. <i>Força Normal Constante</i>	153
5.3.2. <i>Pressão Constante</i>	154
5.3.3. <i>Análise Comparativa Global de Resultados</i>	154
5.4. <i>Influência da “força normal constante” e “pressão constante” sobre o coeficiente de atrito</i>	155
5.4.1. <i>Comportamento mecânico do material do corpo-de-prova</i>	156
5.4.2. <i>Passo entre riscos</i>	157
5.4.3. <i>Atuações dos modos de desgaste abrasivo</i>	159
5.5. <i>Relação entre taxa de desgaste e coeficiente de atrito</i>	164
5.6. <i>Valores “aparente” e “real” do coeficiente de atrito</i>	167
Capítulo 6	
Conclusões	171
6.1. <i>Contribuições</i>	171
6.2. <i>Pesquisas Iniciais – Conclusões</i>	172
6.3. <i>Pesquisas Definitivas – Conclusões</i>	174
Referências Bibliográficas	175
Apêndice 1	195
Apêndice 2	201
Apêndice 3	227
Apêndice 4	277
Sugestões para Trabalhos Futuros	290

Capítulo 1

Introdução

1.1. Definição de Tribologia

Tribologia: palavra originária do grego **τριβος**, “tribo”, que significa “esfregar”, “atritar”, “friccionar”, e **λόγος**, “logos”, significando “estudo” [1].

Em 1995, a definição de “Tribologia” ainda não constava no “Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa” [2], mas o “The American Heritage Dictionary” [3] a especifica como:

tri•bol•o•gy (trī-bŏl’ə-jē, trīb-ŏl’-) *n.* The science of the mechanisms of friction, lubrication, and wear of interacting surfaces that are in relative motion. [Gk. *tribein*, to rub + -LOGY.]

Na Língua Portuguesa, uma possível tradução é: “A ciência dos mecanismos de atrito, lubrificação e desgaste de interações de superfícies que estão em movimento relativo”, conforme “The American Heritage Dictionary” [3]. Adotando-se um vocabulário mais simples, “Tribologia” pode ser interpretada como a ciência que estuda “atrito”, “desgaste” e “lubrificação”.

1.2. Importância da ciência “Tribologia”

Nos EUA, a perda de energia nos automóveis, decorrente do atrito ocasiona, anualmente, um prejuízo da ordem de US\$500 bilhões; no Brasil, este desperdício está na ordem de 5% do PIB – Produto Interno Bruto [4]. Em termos gerais, o impacto do desgaste na economia de um país fica compreendido entre 1 – 10% PIB.

Por outro lado, “atrito” e “desgaste” não devem ser vistos somente como os “vilões da história”. Em muitas situações, o atrito, até certo nível, é benéfico, como, por exemplo, o atrito entre os pneus de um carro e o asfalto, ou o atrito entre nossos calçados e o chão.

Em setores industriais, em que o desgaste causa a parada, ou a diminuição da produção, ou envolve elevados custos de manutenção, não é suficiente adquirir conhecimentos apenas em materiais e processos metalúrgicos e/ou mecânicos de fabricação. Tão importante quanto isso é pesquisar, estudar e entender não só os processos de desgaste que atuam em condições específicas, mas também, os conceitos envolvidos (o trabalho de Fillot *et al.* [5] pode ser citado como exemplo).

Dentre os vários tipos de desgaste, classificados pela norma ASTM G40 – 96 [6], está o *desgaste abrasivo* que, em termos gerais, é responsável por, aproximadamente, 50% dos problemas industriais, envolvendo desgaste, mas, por outro lado, faz parte do princípio de diversos processos industriais como, por exemplo, corte por jato d'água, retificação e polimento de moldes para injeção de termoplásticos. Outra aplicação importante de pesquisas científicas sobre desgaste abrasivo está ligada a estudos envolvendo o estudo do desgaste micro-abrasivo atuante em ferramentas de corte, durante operações de usinagem.

Esse tipo de estudo deve ser mais difundido entre os pesquisadores brasileiros, pois o Brasil encontra-se em posição de destaque no setor de usinagem. Essa posição privilegiada começa no próprio aprendizado. A Alemanha, um dos países mais avançados na área de mecânica, tem como referência o ensino realizado no Brasil pelas escolas SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Um exemplo da qualidade dos profissionais brasileiros, envolvidos em usinagem está no fato de que, foram fabricados, em território nacional, pela própria rede SENAI, vários componentes para a Estação Espacial Internacional, projeto do qual o Brasil faz parte.

Todo o panorama ao redor da usinagem, realizada no Brasil, mostra que não é importante investir somente no desenvolvimento de novos equipamentos, como as máquinas HSM (High Speed Machine). Tão importante quanto isso é desenvolver pesquisas, com a finalidade de melhorar o desempenho das ferramentas de corte utilizadas por esses novos equipamentos. Isso porque, atualmente, em operações de usinagem que utilizam tecnologias de ponta (tanto as tecnologias relacionadas aos equipamentos, quanto aos avanços atingidos na parte de materiais), *a limitação em geral é a ferramenta de corte e não a máquina-operatriz.*

O melhor desempenho das ferramentas de corte, almejado pelos profissionais envolvidos na área (tanto pesquisadores, quanto profissionais da própria área de usinagem) pode ser obtido por meio de pesquisas, envolvendo materiais e/ou estudos dos tipos de desgaste aos que as ferramentas de corte estão submetidas (entre eles, o desgaste abrasivo).

Apenas para se ter uma idéia da importância do setor de usinagem, tomando-se como referência os Estados Unidos, em 1989, foram investidos US\$100 bilhões nesse setor, o que mostra a importância, não só deste processo na economia de um país [7], *como também na pesquisa científica envolvida.*

Em relação às questões sociais, a AACD – Associação de Assistência a Criança Deficiente – realiza contínuos trabalhos relacionados à fabricação de aparelhos ortopédicos, os quais são repassados, gratuitamente, às pessoas. Entretanto, ainda um ponto importante a

ser destacado refere-se às próteses humanas, das quais o Brasil realiza a importação no equivalente a US\$800 milhões. As Engenharias “Mecânica” e “Metalúrgica e de Materiais”, por meio da Tribologia, podem concentrar esforços no âmbito de tais mecanismos serem desenvolvidos dentro da nação, uma vez que 109 articulações são suscetíveis ao atrito e, consequentemente, ao desgaste [4].

Em vista do panorama exposto, pesquisas científicas sobre desgaste abrasivo tornam-se importantes, não só em termos científicos, mas também em termos econômicos e sociais.

1.3. Ensaios de desgaste abrasivo – síntese histórica

Mikhail Lomonosov, membro da Academia Científica de Moscou, com o objetivo de estudar a abrasão de metais, minerais e vidros, realizou um dos primeiros ensaios de desgaste abrasivo¹, entre 1745 e 1765. Basicamente, seu equipamento era formado por um rebolo de diâmetro 460 mm que, em movimento de rotação, permanecia em contato com um corpo-de-prova, ao qual a aplicação da força normal era realizada por meio de um sistema de peso-morto [8]. O rebolo gerava uma marca no corpo-de-prova e, a partir desta, analisava-se o comportamento ao desgaste do mesmo.

O ensaio sofreu algumas modificações em 1921, por Johan August Brinell que, além de substituir o rebolo por um disco de aço de 100 mm de diâmetro, inseriu partículas de quartzo entre a amostra e o disco [8]. Em 1949, R.D. Haworth Jr. realizou o primeiro ensaio de desgaste abrasivo, utilizando um volante de borracha e, P. Grodzinski, um disco de ferro fundido com 25 mm de diâmetro, junto às partículas abrasivas de diamante, situadas entre o disco e o corpo-de-prova, sendo aplicadas forças normais entre 0,2 N e 5 N [8].

O ensaio de desgaste abrasivo, aplicado em filmes finos, teve um progresso significativo em 1991, quando Kassman *et al.* [9] desenvolveram uma configuração de equipamento denominada “dimple grinder” (Figura 1.1 [9,10]) e determinaram, pela primeira vez, os coeficientes de desgaste² do revestimento e do substrato de maneira independente [8]. O corpo-de-prova, ao qual a força normal é aplicada, permanece submerso em uma pasta abrasiva durante o ensaio [9].

¹ Desgaste abrasivo: será definido no Capítulo 2.

² A explicação do significado físico da grandeza “coeficiente de desgaste” será dada no Capítulo 2.

Figura 1.1. Princípio do ensaio “dimple grinder” [9,10].

Nas pesquisas atuais, há autores [11] que utilizam o “dimple grinder” configurado por Kassman *et al.* [9] mas, em 1996, K.L. Rutherford e I.M. Hutchings introduziram o “ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa” e, embora o mesmo tenha sido projetado para o setor produtivo, em que foi, inicialmente, adotado apenas para medir a espessura de revestimentos, atualmente, pelo seu potencial, é aplicado em pesquisas, envolvendo materiais metálicos e não-metálicos. O princípio do ensaio consiste no desgaste gerado em um corpo-de-prova por uma esfera (em movimento de rotação) e por partículas abrasivas, inseridas entre estes dois elementos. Por intermédio das análises das marcas de desgaste formadas, pode ser possível prever, ou, pelo menos, estimar o comportamento ao desgaste abrasivo de um material em condições reais de trabalho.

1.4. Estruturação da pesquisa

Esta Tese volta-se, integralmente, para pesquisas relacionadas a ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, sendo, o Capítulo 2, dedicado a conceitos referentes á desgaste micro-abrasivo. Na sequência, o Capítulo 3 expõe os “Objetivos” e os “Materiais e Métodos”, seguido pelos Capítulos 4 e 5, detalhando os resultados obtidos, assim como as respectivas discussões. Finalizando, no Capítulo 6 encontram-se as conclusões desta pesquisa.

Completando este texto, nos Apêndices 2 e 3 está detalhada toda a configuração do último “equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa”, projetado e construído para a realização desta Tese de Doutorado.

Capítulo 2

Desgaste Micro-Abrasivo

2.1. Ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa

Princípio do ensaio.

A Figura 2.1 [12] ilustra, de forma esquemática, o princípio do “ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa”, chamado de “ball-cratering abrasion test” ou “micro-scale abrasive wear test” [13], na Língua Inglesa.

Figura 2.1. Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [12].

Ao lado da esfera de ensaio, que se encontra somente sob movimento de rotação (n), está o corpo-de-prova. Durante os ensaios, é inserida uma pasta abrasiva, geralmente composta por algum pó abrasivo (por exemplo, carbetto de silício – SiC [12,14-38]) e água destilada. A aplicação da força normal (N) sobre o corpo-de-prova, o contato e o movimento relativo entre os componentes do sistema tribológico gera uma força tangencial (força de atrito) – T e uma calota esférica no corpo-de-prova, usualmente denominada de “cratera de desgaste” (“wear crater”, em Inglês).

Não havendo a formação de “ridging” [39], que será explicado posteriormente, durante os ensaios, o corpo-de-prova não entra em contato com a esfera; entre estes dois elementos, estão as partículas abrasivas [40].

Configurações de equipamentos.

Existem duas configurações básicas de equipamentos para a realização de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa: *i*) máquina de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa *livre* (Figura 2.2a) [8,23,28,29,33,41-49] e *ii*) máquina de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa *fixa* (Figura 2.2b) [12-17,19-28,34-38,43,50-62].

Figura 2.2. Equipamentos de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. (a) configuração esfera-livre (foto: cortesia do Prof. Dr. J.D.B. de Mello, UFU – Universidade Federal de Uberlândia); (b) configuração esfera-fixada [23,27].

No equipamento de configuração esfera-livre, a rotação da esfera ocorre devido à rotação (em sentido oposto) do eixo-motor (Figura 2.2a) e, no equipamento de configuração esfera-fixada, o movimento de rotação da esfera acontece em conjunto com o eixo, no qual a mesma está fixada (Figura 2.2b).

Parâmetros de ensaio.

Em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa (de configuração “esfera-livre” ou “esfera-fixada”) é possível definir a *i*) força normal, *ii*) distância de deslizamento (S) (entre a esfera e o corpo-de-prova), *iii*) diâmetro da esfera de ensaio, *iv*) rotação da esfera de ensaio, *v*) concentração da pasta abrasiva (C), *vi*) viscosidade do fluido da pasta abrasiva, *vii*) características (dureza – H_A , forma – F e tamanho – D_p) das partículas abrasivas e a *viii*) vazão do composto abrasivo (introduzido entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio), além dos próprios materiais do corpo-de-prova e da esfera de ensaio.

Na Seção 2.5. serão examinadas as influências dos parâmetros *i*), *ii*), *iv*), *v*), *vi*) e *vii*) sobre o comportamento ao desgaste abrasivo dos materiais. A ação do “diâmetro da esfera de ensaio” não será discutida, pois, praticamente, na totalidade das pesquisas reportadas, os autores utilizaram esferas de diâmetro 1” (25,4 mm), embora, em algumas exceções, esferas de outros diâmetros foram adotadas [46,63]. Em relação à vazão do composto abrasivo, não foram relatados trabalhos que focassem a influência deste parâmetro sobre o comportamento do desgaste abrasivo.

Grandezas geométricas.

Em uma cratera de desgaste, são analisadas três grandezas geométricas: diâmetro (d), profundidade (h) e volume (de material removido) (V). A Figura 2.3 apresenta estas grandezas.

Figura. 2.3. Imagens de crateras de desgaste: (a) diâmetro – d [64]; (b) profundidade – h (ilustração esquemática); (c) volume – V [45].

O diâmetro da cratera de desgaste pode ser medido por meio de microscopia óptica [8], mas há a possibilidade de se aplicar outros métodos. Por exemplo, softwares de CAD (Computer Aided Design) [22,38,52,] e “PC scanners” [65] podem ser utilizados para este propósito.

Em função de “ d ”, a profundidade e o volume da cratera de desgaste podem ser calculados pelas Equações 2.1a e 2.1b [8,66], respectivamente.

$$h \cong \frac{d^2}{8R} \quad \text{para } d \ll R \quad (2.1a)$$

$$V \cong \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d \ll R \quad (2.1b)$$

Sendo R , o raio da esfera de ensaio.

As Equações 2.1a e 2.1b valem para $d \ll R$ que, em regras gerais, é a condição que se observa em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Para uma esfera de diâmetro $D = 25,4$ mm (1”), Cozza [22], em sua Dissertação de Mestrado, apresenta equações para os cálculos de h e V que independem da restrição $d \ll R$ (Equações 2.1c e 2.1d).

$$h = 12,70 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2} \quad (2.1c)$$

$$V = \pi \left(12,70h^2 - \frac{h^3}{3} \right) \quad (2.1d)$$

Unidades de d , h e V : [mm].

Formas de realização dos ensaios.

Baptista *et al.* [68] propõem dois métodos para a realização de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Neste tópico, para as respectivas explicações, tais procedimentos foram denominados *Método_A* e *Método_B*.

Pelo *Método_A*, há paradas intermediárias, após um determinado tempo de ensaio. Por exemplo, a cada 5 minutos ou, em intervalos de tempos diferentes entre si, o ensaio é interrompido para a análise da calota esférica. Em seguida, o ensaio é reiniciado na mesma posição. Com isso, ao final de todos os ensaios, tem-se somente uma cratera de desgaste. No *Método_B*, não há paradas intermediárias para a obtenção da evolução do diâmetro da cratera de desgaste em função do tempo de ensaio, *i.e.*, uma cratera de desgaste é gerada para cada um dos tempos de ensaio.

Ambos os procedimentos apresentam vantagens e desvantagens. No *Método_A*, há a sobreposição das calotas esféricas, fazendo com que reste somente a última. Porém, é uma metodologia relativamente “rápida”, quando comparada ao *Método_B*. Por outro lado, no final dos ensaios conduzidos pelo *Método_B*, têm-se disponíveis todas as crateras de desgaste produzidas. Além disso, pelo *Método_A*, durante o reinício do ensaio, dependendo da configuração do equipamento e/ou da forma de análise da calota, o corpo-de-prova e/ou a esfera de ensaio podem deslocar-se de suas posições originais, fazendo com que não haja um contato perfeito entre a esfera e a cratera de desgaste iniciada (anterior).

Cozza *et al.* [69] expuseram uma técnica alternativa para a realização dos ensaios. Com o auxílio de uma Régua Linear³, em tempos de ensaio preestabelecidos, a profundidade (h) de penetração da esfera no corpo-de-prova é medida ao longo de cada experimento. Com h , o volume de desgaste pode ser calculado pela Equação 2.2 [30,35]:

$$V \cong \pi R h^2 \quad \text{para } h \ll R \quad (2.2)$$

Em um único ensaio e sem a interrupção do mesmo, diversos valores de h podem ser obtidos. Entretanto, assim como nos métodos descritos por Baptista *et al.* [68], a metodologia de ensaio sugerida por Cozza *et al.* [69] também apresenta vantagens e desvantagens. Como vantagem, pode-se citar, principalmente, o menor tempo necessário para a realização dos ensaios, quando comparado, até mesmo, ao tempo dispendido no *Método_A*, devido ao fato de não haver a necessidade de paradas intermediárias. Entretanto, não é possível analisar crateras de desgaste durante o ensaio; a única cratera de desgaste que se torna acessível para pesquisa é a cratera final.

2.2. Desgaste micro-abrasivo: definição – classificação – terminologia

2.2.1. Definição: distinção entre “desgaste abrasivo” e “desgaste micro-abrasivo”

“Desgaste” pode ser definido como sendo “o dano em uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de massa, devido ao contato e ao movimento relativo entre a superfície e outro material (ou, outros materiais)” [70].

Entretanto, para cada tipo de desgaste, tem-se uma definição específica. O “desgaste abrasivo”, focado nesta Tese, é definido como sendo “o desgaste gerado por partículas ou protuberâncias, forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida” [6].

“Desgaste abrasivo” e “desgaste micro-abrasivo” são termos encontrados em artigos técnicos e científicos, voltados ao estudo de tribologia. Entretanto, a literatura [6,71-73] não define separadamente cada um destes termos. Isso porque, o “desgaste micro-abrasivo” enquadra-se no conceito de “desgaste abrasivo”.

³ A configuração final do equipamento no qual Cozza *et al.* [69] desenvolveram esta nova metodologia para a execução de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, está detalhada nos Apêndices 2 e 3 desta Tese.

Alguns parâmetros que podem ser utilizados para diferenciar “desgaste abrasivo” de “desgaste micro-abrasivo” são a taxa de desgaste (Q)⁴ [22], o coeficiente de desgaste (k)⁵ [22] e o tamanho médio das partículas abrasivas (D_p) envolvidas no processo de desgaste. Enquanto que no “desgaste micro-abrasivo” o coeficiente de desgaste varia entre 1.10^{-6} e $2,5.10^{-4} \frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$ [34,35,74], no “desgaste abrasivo” observam-se valores até 100 mil vezes maiores, variando entre 1.10^{-2} e $1,2.10^{-1} \frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$ [75]. Em relação à distinção quanto ao material abrasivo, o “desgaste micro-abrasivo”, geralmente, envolve a participação de partículas com tamanho médio na ordem de micrômetros. Por exemplo, partículas abrasivas com tamanho médio entre 1 e 50 μm , aproximadamente, são comuns de serem utilizadas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [12,13,22-27,35,42,44,46,50,68,69,76-89]. Já o “desgaste abrasivo” é, normalmente, gerado por partículas relativamente maiores, entre 50 e 700 μm , por exemplo [75,90-95]. Entretanto, é importante salientar que os parâmetros Q , k e D_p foram mencionados de forma a serem referências quantitativas para o pesquisador, podendo outras grandezas e valores serem adotados para definir a diferença entre desgaste “abrasivo” e “micro-abrasivo”.

Em termos práticos, pode-se dizer que ensaios de desgaste do tipo “esfera rotativa” geram “desgaste micro-abrasivo” [12,22-27,69] e, dos tipos “roda-de-borracha” [91,93] e “pino-sobre-disco” [96,97], “desgaste abrasivo”.

Vale salientar ainda que, para que um material sofra “desgaste micro-abrasivo”, não é preciso que o mesmo seja necessariamente submetido a um “ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa”. Sasada *et al.* [98], por intermédio de um equipamento com configuração diferente ao de “esfera rotativa”, relataram valores de k similares aos mencionados acima, ou seja, eles produziram “desgaste micro-abrasivo” nos corpos-de-prova.

Nesta Tese, serão encontradas frases envolvendo os termos “desgaste abrasivo” e “ensaio de desgaste micro-abrasivo”. Isso pode fazer com que surja a seguinte dúvida: “...se o material foi submetido a um “ensaio de desgaste micro-abrasivo”, significa que o mesmo sofreu “desgaste micro-abrasivo” e não “desgaste abrasivo”?”. Isto significa que o tipo de

⁴ Em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, “taxa de desgaste” (Q) pode ser definida como o quociente entre o volume da cratera de desgaste (V) e a distância de deslizamento (S) entre a esfera e o corpo-de-prova [22]. Usualmente, é interpretada como o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento, podendo ser adotada, por exemplo, a unidade $[\text{mm}^3/\text{m}]$ [22,99].

⁵ O “coeficiente de desgaste” (k) nada mais é que uma “taxa de desgaste” que considera, além da distância de deslizamento, a força normal aplicada sobre o corpo-de-prova [22]. Neste caso, esta grandeza pode ser explanada como o volume de material removido por unidade de força normal e por unidade de distância de deslizamento, sendo adotada a unidade $[\text{mm}^3/\text{N.m}]$, por exemplo [22].

desgaste gerado no material foi “abrasivo”, mas o ensaio forneceu faixas de coeficiente de desgaste compreendidas nas ordens de valores referenciados como “micro-abrasivo”.

2.2.2. Classificação: modos de desgaste abrasivo

Tradicionalmente, o desgaste abrasivo é classificado em dois modos: i) *desgaste abrasivo a dois-corpos* e ii) *desgaste abrasivo a três-corpos* [75,100-102].

Na Língua Inglesa, os termos “desgaste abrasivo a dois-corpos” e “desgaste abrasivo a três-corpos” são encontrados, cada um, sob duas denominações: “two-body abrasive wear” ou “grooving abrasion” e, “three-body abrasive wear” ou “rolling abrasion”, respectivamente [35]. “Grooving abrasion” devido às ranhuras (“grooves”) que as superfícies desgastadas apresentam e, “rolling abrasion”, devido ao movimento de rolamento que as partículas abrasivas realizam durante o processo de desgaste, o que gera características específicas na superfície desgastada, como será visto adiante.

Na Língua Portuguesa, os termos “desgaste abrasivo a dois-corpos” e “desgaste abrasivo a três-corpos” são, comumente, substituídos por “desgaste abrasivo por riscamento” (“grooving abrasion”) e “desgaste abrasivo por rolamento” ou “desgaste abrasivo por indentações múltiplas” (“rolling abrasion”), respectivamente.

Considerando duas superfícies em movimento relativo, no “desgaste abrasivo por riscamento”, as partículas abrasivas estão aderidas (mas, não necessariamente incrustadas, fixadas) em uma das superfícies (Figura 2.4a [75,102]), sendo possível a elas, somente o movimento de translação (“deslizamento”) sobre o contra-corpo. No “desgaste abrasivo por rolamento”, as partículas abrasivas estão livres entre as duas superfícies, podendo rolar entre as mesmas (Figura 2.4b [75,102]).

Figura 2.4. Princípio do (a) desgaste abrasivo por riscamento e do (b) desgaste abrasivo por rolamento [75,102].

As classificações “riscamento” e “rolamento” se baseiam nas marcas de desgaste geradas pelas partículas abrasivas no corpo-de-prova, como exhibe a Figura 2.5 [12,35].

Figura 2.5. Marcas de (a) desgaste abrasivo por riscamento [12] e (b) desgaste abrasivo por rolamento [35], geradas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

As Figuras 2.5a e 2.5b exibem, separadamente, as atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento”, respectivamente. Entretanto, dependendo das condições de ensaio, é possível que haja as atuações de ambos os modos [22-24,35-38]. A Figura 2.6 [23] apresenta um exemplo deste fenômeno, em que A_t é a área projetada total da cratera de desgaste, A_r é a área projetada com atuação de desgaste abrasivo por rolamento e, A_g , a área projetada com atuação de desgaste abrasivo por riscamento; os índices “t”, “r” e “g” fazem referências aos termos “total”, “rolling” e “grooving”, respectivamente. Neste caso, o modo de desgaste abrasivo é classificado como “modo-misto” (“mixed-mode”, na Língua Inglesa [50]). Em sua Dissertação de Mestrado, R.C. Cozza [22] adotou o termo “desgaste abrasivo misto”, para referenciar o “modo-misto” de desgaste abrasivo.

Figura 2.6. Desgaste abrasivo misto [22]: atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e desgaste abrasivo por riscamento [12,23].

Frequentemente, no “desgaste abrasivo misto”, há a ocorrência de “desgaste abrasivo por riscamento” no centro da cratera de desgaste, e “desgaste abrasivo por rolamento” nas bordas [22,23,35,50]. A causa deste comportamento será explicada ao longo deste texto.

Além das Equações 2.2 e 2.3, que definem o volume de desgaste em função de “ d ” e “ h ”, respectivamente, Wong *et al.* [103] mencionam a possibilidade do cálculo de “ V ” com base nas atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” ou “rolamento”. Estes autores nortearam-se nos trabalhos de Moore [104] e Rabinowicz *et al.* [105].

2.2.3. Terminologia

Nesta Tese, foram adotados os termos “desgaste abrasivo por riscamento” e “desgaste abrasivo por rolamento”, para diferenciar os modos de desgaste abrasivo, além de “desgaste abrasivo misto”, utilizado na ocorrência de ambos.

Na literatura [72,106-109], pode-se encontrar, ainda, outras terminologias (ou, sub-classificações) para o desgaste abrasivo, mas as mesmas não serão apresentadas e discutidas neste trabalho. Entretanto, é importante inserir os conceitos de “desgaste abrasivo sob baixa-tensão” (“low-stress abrasion”) e “desgaste abrasivo sob alta-tensão” (“high-stress abrasion”) [107], pois serão utilizados nas discussões dos resultados.

Basicamente, a diferença entre desgaste abrasivo sob “baixa-tensão” e desgaste abrasivo sob “alta-tensão” está na “não-fragmentação” e “fragmentação” das partículas abrasivas durante o processo de desgaste [72,107], respectivamente.

A fragmentação das partículas abrasivas depende, em princípio, das condições de ensaio e do próprio material abrasivo. Por exemplo, existem dois tipos de carbetos de silício: “carbeto de silício preto” e “carbeto de silício verde” [110]. Além destas colorações, que variam em função das impurezas de cada material [110], outra diferença entre eles é a “friabilidade”, propriedade associada à capacidade de um material abrasivo manter, constantemente, arestas cortantes [26]. O carbeto de silício “verde” apresenta maior friabilidade (diz-se que, “é mais friável”) que o “preto” [26], e esta característica pode estar associada a um maior nível de fracionamento destas partículas.

2.3. Equação de Archard para o desgaste abrasivo

Formulação clássica.

Considere o ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa esquematizado na Figura 2.7.

Figura 2.7. Partículas abrasivas atuando entre a esfera e o corpo-de-prova, em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa (ilustração esquemática; esta figura não configura qualquer tipo de comportamento que as partículas abrasivas podem vir a apresentar durante o processo de desgaste).

A taxa de desgaste gerada pelas “ n_p ” partículas abrasivas atuantes no sistema tribológico pode ser definida pela “equação de Archard para o desgaste abrasivo”^{6,7} (Equação 2.3) [75]:

$$Q = \xi \frac{N}{H} \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3, ξ mede a severidade do desgaste (quanto maior for ξ , maior será a taxa de desgaste). É um valor adimensional e sempre menor que 1. Para o desgaste abrasivo por riscamento, ξ comumente está entre $\cong 5.10^{-3}$ e $\cong 50.10^{-3}$ e, para o desgaste abrasivo por rolamento, entre $\cong 0,5.10^{-3}$ e $\cong 5.10^{-3}$ [75]. H é a dureza do material desgastado.

Fazendo $k = \frac{\xi}{H}$ e substituindo na Equação 2.3, a “equação de Archard para o desgaste abrasivo” torna-se (Equação 2.4) [75]:

$$Q = k.N \quad (2.4)$$

⁶ A dedução dessa equação está no Anexo I da Dissertação de Mestrado de R.C. Cozza [22].

⁷ Há, também, a dedução da “equação de Archard para o desgaste por deslizamento” [75].

Na equação deduzida, o coeficiente de desgaste pode ser calculado pela Equação 2.5 ou pela Equação 2.6⁸ [22], para ensaios “ball-cratering”:

$$k = \frac{V}{N.S} \quad (2.5)$$

$$k = \frac{d^4}{128N.R^2.t.n} \quad (2.6)$$

Em que t , é o tempo de ensaio e, S , a distância de deslizamento.

Formulação prática.

Substituindo a Equação 2.5 na Equação 2.4, a taxa de desgaste pode ser calculada pela Equação 2.7:

$$Q = \frac{V}{S} \quad (2.7)$$

Que é uma maneira prática e simples para a determinação de Q .

2.4. Regime Permanente de Desgaste – RPD

Diz-se que o processo de desgaste atingiu o regime permanente quando o coeficiente de desgaste (ou, a taxa de desgaste) permanece constante ao longo do tempo [22,45].

A Figura 2.8 mostra exemplos em que o Regime Permanente de Desgaste (RPD) foi alcançado.

⁸ A dedução dessa equação está no Anexo III da Dissertação de Mestrado de R.C. Cozza [22].

Figura 2.8. Gráficos do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio. Indicação da obtenção do Regime Permanente de Desgaste, definido pela estabilização de k . (a) Cortesia do Prof. Dr. J.D.B. de Mello, UFU – Universidade Federal de Uberlândia. (b) Ensaios realizados em um corpo-de-prova revestido com nitreto de titânio – TiN; os termos k_t , k_s e k_c referem-se, respectivamente, ao coeficiente de desgaste total (substrato + revestimento), ao coeficiente de desgaste do substrato e ao coeficiente de desgaste do revestimento [69].

Nos resultados apresentados na Figura 2.8a, foi utilizado um corpo-de-prova de aço-rápido e uma esfera com diâmetro $D = 30 \text{ mm}$, a uma rotação de $n = 150 \text{ rpm}$. Como material abrasivo, foi utilizado sílica (SiO_2), com tamanho médio de partícula de $1,83 \text{ }\mu\text{m}$, forma esferoidal e dureza entre 7,4 e 12,4 GPa (750 e 1260 HV, respectivamente). A concentração da pasta abrasiva foi definida em 10% de água destilada e 90% de SiO_2 , em peso. Adotou-se uma força normal de $N = 0,45 \text{ N}$ e tempos de ensaio de $t = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45$ e 50 minutos. Para cada condição de ensaio, foram realizadas três repetições.

Os ensaios referentes aos resultados apresentados na Figura 2.8b [69] foram obtidos a partir de um corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI D2, revestido com um filme fino de nitreto de titânio (TiN), de espessura $h_c = 2 \mu\text{m}$ [111]. Os termos k_t , k_s e k_c referem-se, respectivamente, ao coeficiente de desgaste total (substrato + revestimento), ao coeficiente de desgaste do substrato e ao coeficiente de desgaste do revestimento (“coating”). Foi utilizada uma esfera de aço-rápido AISI 52100, de diâmetro $D = 25,4 \text{ mm}$ (1”), sob uma rotação $n = 37,6 \text{ rpm}$. A pasta abrasiva foi preparada com partículas abrasivas de carbeto de silício (SiC) preto (tamanho médio de partícula de $5 \mu\text{m}$) e água destilada, a uma razão de 25% SiC e 75% H_2O destilada (em volume), resultando em $1,045 \frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O-Destilada}}$, que é considerado um valor de concentração relativamente elevado [35]. Os ensaios foram conduzidos sob uma força normal de $N = 1,25 \text{ N}$ e seis diferentes valores de distância de deslizamento: $S_1 = 10 \text{ m}$, $S_2 = 16 \text{ m}$, $S_3 = 25 \text{ m}$, $S_4 = 40 \text{ m}$, $S_5 = 63 \text{ m}$ e $S_6 = 100 \text{ m}$, definidos com base na Série de Renard R20/4 – Norma DIN 804 [112], resultando em tempos de ensaio de $t_1 = 200 \text{ s}$ (3 min 20 s), $t_2 = 320 \text{ s}$ (5 min 20 s), $t_3 = 500 \text{ s}$ (8 min 20 s), $t_4 = 800 \text{ s}$ (13 min 20 s), $t_5 = 1.260 \text{ s}$ (21 min) e $t_6 = 2.000 \text{ s}$ (33 min 20 s). Para cada valor de S , foram realizadas três repetições.

Nos resultados apresentados na Figura 2.8a, o Regime Permanente de Desgaste foi obtido a partir de 353 metros de distância de deslizamento (25 minutos de ensaio) e, nos resultados apresentados na Figura 2.8b, a partir de 13 minutos e 25 segundos de ensaio (800 s).

Em princípio, não existe uma distância de deslizamento, ou um tempo de ensaio padrão, para o qual o processo de desgaste atinja o regime permanente. Isso depende, principalmente, dos materiais do corpo-de-prova e da esfera de ensaio. Além disso, a força normal, dureza, forma e tamanho médio das partículas abrasivas, concentração da pasta abrasiva e sua vazão entre o corpo-de-prova e a esfera podem influir na obtenção do Regime Permanente de Desgaste. Ao longo da Revisão Bibliográfica desta Tese, não foi encontrado qualquer trabalho que abordasse especificamente este assunto.

Até que o Regime Permanente de Desgaste não tenha sido atingido, o gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio ($k = f(t)$), ou o gráfico do coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento ($k = f(S)$), pode apresentar qualquer comportamento, como pode ser observado na Figura 2.8. Assim como no parágrafo anterior, não foi localizado qualquer artigo que versasse sobre esse tema.

Além dos gráficos de $k = f(t)$ e $k = f(S)$, a análise do Regime Permanente de Desgaste também pode ser realizada por intermédio dos gráficos da taxa de desgaste em

função do tempo de ensaio ($Q = f(t)$), e da taxa de desgaste em função da distância de deslizamento ($Q = f(S)$). Os gráficos de $Q = f(t)$ e $Q = f(S)$ apresentam o mesmo comportamento dos gráficos de $k = f(t)$ e $k = f(S)$, respectivamente. Isso porque, pela equação de Archard para o desgaste abrasivo, $Q = k.N$ (Equação 2.4), mantendo-se a força normal constante, a taxa de desgaste fica em função (somente) do coeficiente de desgaste. Logo, em todos os pontos, antes e após a obtenção do Regime Permanente de Desgaste, a taxa de desgaste apresentará o mesmo comportamento do coeficiente de desgaste, seja em função do tempo de ensaio ou da distância de deslizamento.

Outra maneira de verificar se o Regime Permanente de Desgaste foi alcançado é por meio das análises dos gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio ($V = f(t)$), ou do volume de desgaste em função da distância de deslizamento ($V = f(S)$). Caso o volume de desgaste apresente variação linear com o tempo de ensaio, ou com a distância de deslizamento, pode-se dizer que o Regime Permanente de Desgaste foi atingido [35]. A Figura 2.9 [69] apresenta um gráfico de $V = f(t)$, em que o volume de desgaste apresenta variação linear com o tempo de ensaio, indicando que o Regime Permanente de Desgaste foi obtido.

Figura 2.9. Comportamento linear do volume de desgaste em função do tempo de ensaio, denotando a obtenção do Regime Permanente de Desgaste [69].

Os resultados apresentados na Figura 2.9 são provenientes dos mesmos ensaios da Figura 2.8b [69]. Os termos V_t , V_s e V_c referem-se, respectivamente, ao volume de desgaste total (substrato + revestimento), ao volume de desgaste do substrato e ao volume de desgaste do revestimento.

O comportamento linear do volume de desgaste, em função do tempo de ensaio, independe do sistema ser “revestido” ou “não-revestido”. Uma simples comparação entre estes pode ser realizada com base nos trabalhos de Franco Júnior *et al.* [113], no qual são apresentados resultados referentes a $V = f(t)$ para sistemas revestidos, e Trezona *et al.* [35], em que são analisados corpos-de-prova de aço-ferramenta sem revestimento.

Ainda em sistemas revestidos, Ramalho [32,114] relatou comportamentos não-lineares de $V = f(SN)$, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [32] e em ensaios de desgaste micro-abrasivo conduzidos em um equipamento com configuração diferente ao “ball-cratering” [114] (estes não serão discutidos nesta Revisão Bibliográfica, pois não se enquadram no escopo desta pesquisa).

A Figura 2.10 apresenta os resultados obtidos por Ramalho [32], em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

Figura 2.10. Comportamento não-linear do volume de desgaste, em função de SN (“distância de deslizamento” $\times$ “força normal”) [32]. Resultados obtidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

Nos resultados apresentados na Figura 2.10 [32], foram utilizados um corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2, revestido com cobre (espessura: $h_c = 9 \mu\text{m}$) e uma esfera de aço para rolamento, com diâmetro $D = 25,4 \text{ mm}$, sob uma rotação de 75 rpm. A pasta abrasiva foi composta por 20% de SiC (tamanho médio de partícula de $8 \mu\text{m}$) e 80% de água destilada, em volume. Em todos os experimentos, foi estabelecida a força normal de 0,2 N.

Ramalho [32] fez comparações entre análises teóricas e experimentais, mas, infelizmente, não explicou o porque do comportamento não-linear do volume de desgaste em função de SN (“distância de deslizamento” $\times$ “força normal”), que pode ser entendido como

um parâmetro proporcional à energia dissipada no sistema tribológico “esfera-de-ensaio + partículas abrasivas + corpo-de-prova” [32]. Embora V_t e V_c não estejam diretamente em função de t ou S (somente), a força normal é constante, o que, a princípio, deveria fazer com que V_t e V_c apresentassem uma variação linear com SN , como publicado por Trezona e Hutchings [61] (Figura 2.11), e detalhado nos Itens 2.5.1. e 2.5.2.. Lamentavelmente, no trabalho referenciado [32], o autor não questiona, ainda, se o tipo de comportamento apresentado pelo volume de desgaste caracteriza a obtenção do Regime Permanente de Desgaste. Entretanto, é importante salientar que, embora Ramalho [32] não tenha focado suas discussões sobre o comportamento (diferenciado) do volume de desgaste em função de SN e sobre a obtenção, ou não, do Regime Permanente de Desgaste, estes assuntos não foram os objetivos de seu trabalho.

Figura 2.11. Comportamento linear do volume de desgaste em função de SN [61]. Corpo-de-prova: PMMA (polimetacrilato de metila). Força normal: $N = 0,25$ N. Pasta abrasiva composta por 18,9% SiC (tamanho médio de partícula: $4,25 \mu\text{m}$) e 81,1% H_2O -Destilada, em volume.

Para V_t e V_c (Figura 2.10 [32]) há três curvas: *i*) a primeira curva (“ V_t (teórico)” e “ V_c (teórico)”) refere-se ao modelo matemático proposto pelo autor, *ii*) a segunda curva (“ V_t (experimental)” e “ V_c (experimental)”) é referente aos resultados práticos obtidos a partir do modelo teórico sugerido e *iii*) a terceira curva foi obtida a partir das Equações 2.1b e 2.8, para os cálculos de V_t e V_c , respectivamente.

$$V_c = \frac{\pi}{64R}(b^2 - a^2) \quad (2.8)$$

A Figura 2.12⁹ [69] exibe as grandezas V_t e a , assim como h_c (espessura do revestimento).

Figura 2.12. Imagens de crateras de desgaste geradas em sistemas revestidos: (a) volume de desgaste total – V_t (substrato + revestimento) (ilustração esquemática) [69]; (b) profundidade total da calota – h e espessura do revestimento – h_c (ilustração esquemática) [69]; (c) diâmetro interno – a e diâmetro externo – b [26,69].

Um ponto importante que deve ser ressaltado refere-se à análise dos comportamentos de V , Q e k . Recomenda-se que, antes da obtenção do Regime Permanente de Desgaste, não sejam formalizadas conclusões sobre a pesquisa desenvolvida, visto que, a priori, o desenvolvimento do processo de desgaste antes do alcance do RPD não apresenta um comportamento previsível.

2.5. Parâmetros de ensaio

Propriedades como dureza e tenacidade à fratura e parâmetros microestruturais, como porosidade e tamanho de grão, influenciam na resistência ao desgaste micro-abrasivo de um material [115-118]. Entretanto, a “resistência ao desgaste abrasivo” não é uma propriedade do material; esta depende, na realidade, das condições de ensaio e/ou do tribo-sistema envolvido [115,119,120].

Conforme mencionado no Item 2.1., em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, as variáveis independentes que podem ser controladas são: *i*) força normal, *ii*) distância de deslizamento, *iii*) diâmetro da esfera de ensaio, *iv*) rotação da esfera de ensaio, *v*) concentração da pasta abrasiva, *vi*) viscosidade do fluido da pasta abrasiva, *vii*) características (dureza, forma e tamanho) das partículas abrasivas e a *viii*) vazão do composto abrasivo. A duração do ensaio pode ser considerado um parâmetro “dependente”,

⁹ J. Richter [121] resalta, em sua pesquisa, grandezas geométricas relacionadas a crateras de desgaste geradas em corpos-de-prova revestidos.

pois o mesmo é determinado em função da distância de deslizamento, rotação e diâmetro da esfera de ensaio. As variações (em conjunto ou individualmente) dos fatores *i*)-*viii*) podem alterar a intensidade do desgaste gerado no corpo-de-prova, verificada pelo aumento ou diminuição da (1) taxa de desgaste, do (2) coeficiente de desgaste ou pelo (3) volume de desgaste da cratera formada, conforme será exposto a seguir.

2.5.1. Força normal

Na literatura, há pesquisas que abordam a influência da força normal sobre a taxa de desgaste e sobre o coeficiente de desgaste [17-19,50]. Nos parágrafos abaixo, estão detalhados, separadamente, os comportamentos destas grandezas (Q e k) em função da força normal; entretanto, nos artigos acima referenciados, não foi encontrada qualquer pesquisa que abordasse especificamente o comportamento do volume de desgaste (V) em função da variação da força normal.

Comportamento da taxa de desgaste em função da variação da força normal – $Q = f(N)$.

A Figura 2.13 [19] exibe a variação (linear) da taxa de desgaste em função da carga normal aplicada sobre o corpo-de-prova, em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa. Este gráfico refere-se a pesquisas conduzidas em um revestimento de carbeto de boro ($B_{13}C_2$) com 18 μm de espessura, obtido por CVD (Chemical Vapor Deposition – Deposição Química de Vapor). A pasta abrasiva foi composta por SiC (com tamanho médio de partícula de 4,3 μm) e água destilada, a uma concentração de $0,5 \frac{g_{SiC}}{cm^3_{H_2O-Destilada}}$. A esfera de ensaio, de aço AISI 52100, possuía diâmetro $D = 25,4$ mm e foi estabelecida a rotação de 75 rpm para esta. A força normal variou de 0,3 a 2 N.

Nota-se que, embora os pesquisadores Bose e Wood [19] digam que o comportamento do volume de desgaste não tenha sido estritamente linear com a força normal, como o prediz a “Lei de Archard” [122], por uma análise de Regressão Linear, pode-se considerar que o comportamento de $Q = f(N)$ possa ser definido como $Q = \phi N$, conforme conceitua a teoria [122]; ϕ é o coeficiente angular da reta.

Figura 2.13. Comportamento da taxa de desgaste em função da variação da força normal, para um revestimento de carbeto de boro, esfera de aço AISI 52100 e partículas abrasivas de SiC [19].

Comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação da força normal – $k = f(N)$.

Em ensaios conduzidos sobre substratos de aço-carbono revestidos com PA-11 (poliamida-11), com espessura de 400 μm , Bello e Wood [18] observaram variações descendentes de k com o aumento da força normal (Figura 2.14). Como material abrasivo, foi adotado carbeto de silício com tamanho médio de partícula de 5 μm , sob uma concentração de $0,375 \frac{g_{SiC}}{cm^3_{H_2O-Destilada}}$; as esferas de ensaio foram de aço-carbono, com diâmetro de 25 mm e a

faixa de N ficou estabelecida entre 2-10 N [18].

Figura 2.14. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação da força normal, para revestimentos de PA-11, esferas de aço-carbono e partículas abrasivas de SiC [18].

Entretanto, assim como na Figura 2.13, para os mesmos resultados apresentados na Figura 2.14, os autores [18] delinearam um ajuste linear para o gráfico de $Q = f(N)$, como mostra a Figura 2.15.

Figura 2.15. Comportamento da taxa de desgaste em função da variação da força normal, para revestimentos de PA-11, esferas de aço-carbono e partículas abrasivas de SiC [18].

Mesmo obtendo-se um acréscimo linear da taxa de desgaste em função do aumento da carga normal (Figura 2.15), o coeficiente de desgaste apresentou um comportamento descendente com o aumento da mesma (Figura 2.14). Conforme discutido no Item 2.4., estando o processo de desgaste em regime permanente, tanto Q quanto k se estabilizam com o aumento de S (ou, t). Nos gráficos das Figuras 2.14 e 2.15, todos os ensaios foram conduzidos sob a mesma distância de deslizamento¹⁰ e um ponto importante a ser questionado é se, nesta condição, os comportamentos apresentados por Q e k caracterizam a obtenção do RPD, quando do aumento da força normal e constância da distância de deslizamento.

O coeficiente de desgaste não é uma propriedade do material; este depende, na realidade, dos parâmetros de ensaio e do tribo-sistema [119]. Em termos práticos, pode-se dizer que o “coeficiente de desgaste” nada mais é que uma taxa de desgaste que considera, além da distância de deslizamento, a força normal^{11;12}. Na Equação 2.6, mantendo-se R , t e n constantes, e variando-se somente N , o diâmetro da cratera de desgaste (d) (Figura 2.3a) será diretamente proporcional à força normal [22]. Com isso, considerando parâmetros de ensaio idênticos, para alguns materiais, d pode aumentar em proporção maior do que N , fazendo com que k aumente. Em outros materiais, d pode aumentar em proporção menor do que N , fazendo com que k diminua, como é o caso da Figura 2.14. Além disso, mesmo que N aumente ou diminua, a respectiva ascensão, ou declínio de d pode ser tal que o valor de k não se altere, permaneça constante.

¹⁰ No Item 2.4., todos os resultados apresentados foram obtidos a partir de ensaios em que a força normal foi mantida constante e, a distância de deslizamento, variável.

¹¹ Tanto Q quanto k apenas fornecem uma indicação da “resistência ao desgaste” do material, sendo que, esta também não é uma propriedade do mesmo.

¹² O conceito de “taxa de desgaste” é relativo. Por exemplo, a “taxa de desgaste” pode ser considerada, também, como o volume de material removido por unidade de tempo ou por unidade de rotação da esfera de ensaio. Além disso, em outros tipos de ensaio de desgaste abrasivo (como o ensaio “roda-de-borracha”, por exemplo), ao invés de “volume”, muitas vezes, é adotada a grandeza “massa”.

2.5.2. Distância de deslizamento

Neste item, será explicada a influência da distância de deslizamento sobre a i) *formação das crateras de desgaste*, ii) *volume de desgaste*, iii) *taxa de desgaste* e iv) *coeficiente de desgaste*. Na literatura científica, é comum encontrar pesquisas que estabelecem estes parâmetros como função da distância de deslizamento, caso este seja o foco das mesmas [18,19,35,57,77¹³,88,123-125], ou, em alguns casos, em função do produto SN , em que a força normal é mantida constante [28,32,61,121,126-129]. Em relação ao tempo de ensaio, quando S é tomada como variável independente, implicitamente, o mesmo está sendo considerado.

Tanto a distância de deslizamento, quanto o tempo de ensaio, mostram-se parâmetros de importâncias relativamente elevadas em estudos voltados ao desgaste micro-abrasivo gerado por esfera rotativa, pois, em função destas grandezas, os comportamentos de V , Q e k são levantados e, então, pode-se concluir se o Regime Permanente de Desgaste foi obtido, ou não.

Influência da distância de deslizamento sobre a formação das crateras de desgaste.

A Figura 2.16 [61] exibe oito estágios de formação de uma cratera de desgaste, com suas respectivas distâncias de deslizamento e revoluções da esfera de ensaio. Nota-se que, conforme a distância de deslizamento aumenta, a definição da cratera torna-se mais evidente. Para estes resultados, os ensaios foram realizados em um corpo-de-prova de alumínio comercialmente puro, com uma esfera de aço AISI 52100 e sob a ação de $N = 0,25 \text{ N}$ [61]. O material abrasivo foi SiC, com tamanho médio de partícula de $4,25 \mu\text{m}$, a uma concentração de $0,75 \frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O-Destilada}}$.

¹³ Gant *et al.* [77] colocaram o volume de desgaste em função do número de voltas da esfera de ensaio que, indiretamente, é a própria distância de deslizamento.

Figura 2.16. Diferentes estágios de formação de uma cratera de desgaste, com as respectivas distâncias de deslizamento e revoluções da esfera de ensaio [61].

Influência da distância de deslizamento sobre o volume de desgaste.

Como já visto no Item 2.4., estando o processo de desgaste em regime permanente, o volume de desgaste aumenta linearmente com a distância de deslizamento. Na Figura 2.17 [35] é apresentado um gráfico típico de $V = f(S)$, em RPD. Os ensaios foram realizados sobre um corpo-de-prova de aço-ferramenta, com uma esfera de aço para rolamento; a força normal foi de 0,25 N e a pasta abrasiva composta por partículas de carbeto de silício e água destilada, a uma concentração de $0,75 \frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O-Destilada}}$.

Figura 2.17. Variação linear do volume de desgaste em função da distância de deslizamento [35].

A relação linear entre V e S , na Figura 2.17, está em concordância matemática com as Equações 2.9a e 2.9b. Sendo Q e k constantes (o que caracteriza Regime Permanente de Desgaste) nas Equações 2.9a e 2.9b, respectivamente, e fixando o valor de N na Equação 2.9b, o volume de desgaste fica unicamente em função de S , ratificando o conteúdo pertinente exposto no Item 2.4..

$$V = QS \quad (2.9a)$$

$$V = kNS \quad (2.9b)$$

Influência da distância de deslizamento sobre a taxa de desgaste.

Na Figura 2.18 [125] estão resultados obtidos a partir de substratos revestidos. A partir da inclinação da reta de $V = f(S)$, é possível determinar a taxa de desgaste.

Figura 2.18. Gráficos de $V = f(S)$ obtidos a partir de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa em sistemas revestidos, caracterizando Regime Permanente de Desgaste [125]. *Figura editada.*

Tomando-se qualquer uma das retas apresentadas na Figura 2.18 e formando um triângulo retângulo com referência aos eixos S e V , a taxa de desgaste pode ser determinada pela Equação 2.10:

$$Q = \frac{V_2 - V_1}{S_2 - S_1} \quad (2.10)$$

Ou seja, em Regime Permanente de Desgaste, a partir de $V = f(S)$, a taxa de desgaste pode ser calculada por quaisquer dois pares ordenados $(S_i; V_i)$, ou, também, pela Equação 2.11:

$$Q = \frac{dV}{dS} \quad (2.11)$$

Além disso, realizando-se uma análise trigonométrica no triângulo retângulo estabelecido na Figura 2.18, demonstra-se, ainda, que as Equações 2.10 e 2.11 são o coeficiente angular (ϕ) da reta $V = f(S)$ (Equação 2.12):

$$Q = \tan(\phi) \quad (2.12)$$

Mais uma vez, pelas Equações 2.10-2.12, a explicação dada no Item 2.4. foi comprovada; a derivada de uma função do 1º. grau ($V = f(S) = \beta S + \gamma$, em que β e γ são seus coeficientes) é uma função constante (na análise, $Q = \text{constante}$ e, portanto, Regime Permanente de Desgaste).

Influência da distância de deslizamento sobre o coeficiente de desgaste.

Em geral, os pesquisadores publicam seus resultados, com referência ao coeficiente de desgaste e não em relação à taxa de desgaste.

Assim como a taxa de desgaste, em RPD, o comportamento do coeficiente de desgaste deve manter-se constante com o aumento de S . As Figuras 2.19a [19,130] e 2.19b [19] apresentam situações em que esta condição foi obtida. Os resultados da Figura 2.19a referem-se a ensaios conduzidos em revestimentos de diamante (espessura de 15 μm ; obtidos por CVD). A pasta abrasiva foi composta por SiC (com tamanho médio de partícula de 4,3 μm) e água destilada, a uma concentração de $0,5 \frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}-\text{Destilada}}$. Os valores de N e n estão mencionados na própria figura. Em relação à Figura 2.19b, os ensaios foram realizados em filmes finos de TiN-TiC, B_{13}C_2 e diamante, com respectivas espessuras de 8 μm , 18 μm e 15 μm . As demais condições de ensaio foram: $N = 0,75 \text{ N}$, $n = 75 \text{ rpm}$ e $C = 0,5 \frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}-\text{Destilada}}$

(o composto abrasivo foi o mesmo utilizado nos ensaios da Figura 2.19a).

Figura 2.19. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da ascensão da distância de deslizamento. (a) Mesmo corpo-de-prova para diferentes condições de ensaio [19,130]; (b) diferentes corpos-de-prova para condições de ensaio idênticas [19].

Somente na Figura 2.19a há uma curva de $k = f(S)$ em que o Regime Permanente de Desgaste não foi obtido, caracterizado pelo comportamento descendente de k em função de S . Nesta figura, para o mesmo corpo-de-prova e materiais adjacentes (esfera e composto abrasivo), sob diferentes condições de ensaio, obtiveram-se diferentes valores de k . Estes resultados confirmam o que foi formalizado no Item 2.5.1.: “o coeficiente de desgaste não é uma propriedade do material”. Esta grandeza mede apenas a resistência ao desgaste do material, sendo dependente das condições de ensaio.

Uma hipótese importante a ser considerada refere-se à influência da força normal sobre o coeficiente de desgaste. O senso leva a imaginar que maiores forças normais conduzam a maiores valores de k e a maiores distâncias de deslizamento necessárias à obtenção do RPD. Na Figura 2.19a, para a condição de $N = 2$ N (maior força normal adotada), observa-se que o processo de desgaste necessita de uma distância de deslizamento maior para a obtenção do Regime Permanente de Desgaste, mas o coeficiente de desgaste foi menor do que para as forças normais de 0,3 N e 0,75 N. Entretanto, é importante considerar que as rotações da esfera foram diferentes, o que ocasionou, para um mesmo valor de S , diferentes tempos de ensaio. No Item 2.6., as causas destes comportamentos serão discutidas com maiores detalhes.

Nos trabalhos citados neste item (2.5.2.), alguns dos resultados foram apresentados por meio de gráficos $V = f(S)$ (o que, a partir deste, quando em RPD, pode-se determinar Q) ou $V = f(SN)$. Considerando um comportamento linear de $V = f(SN)$ (consolidando, portanto, Regime Permanente de Desgaste), a análise matemática conduzida para Q , exposta pelas Equações 2.10-2.12, é válida, também, para o coeficiente de desgaste; ou seja, k pode ser determinado pelo coeficiente angular da reta $V = f(SN) = \beta SN + \gamma$ (Equações 2.14-2.16). Com isso, impondo que a força normal seja constante e, conceituando-se que o coeficiente de desgaste seja definido pela Equação 2.13, com as Equações 2.10-2.12 são deduzidas, respectivamente, as Equações 2.14-2.16:

$$k = \frac{1}{N} Q \quad (2.13)$$

$$k = \frac{1}{N} \left(\frac{V_2 - V_1}{S_2 - S_1} \right) \quad (2.14)$$

$$k = \frac{1}{N} \frac{dV}{dS} \quad (2.15)$$

$$k = \frac{1}{N} \tan(\varphi) \quad (2.16)$$

Estas, por sua vez, também sustentam o desenvolvimento ostentado no Item 2.4., visto que, derivando-se a equação $V = f(SN) = \beta SN + \gamma$ obtêm-se uma função constante, denotando que o Regime Permanente de Desgaste foi alcançado.

2.5.3. Rotação da esfera de ensaio

Na Equação 2.6, o coeficiente de desgaste está, também, em função da rotação da esfera de ensaio, podendo assim, apresentar um comportamento ascendente, descendente ou manter-se constante.

Na literatura pesquisada, foram encontrados somente quatro trabalhos que tratam da influência da rotação da esfera de ensaio sobre o comportamento ao desgaste [17,19,43,130]. Entretanto, poucas (ou, nenhuma) conclusões podem ser formalizadas com base nas análises de Bose e Wood [19,130], já que estes autores variaram, além da própria rotação da esfera de ensaio, a força normal e a distância de deslizamento. Consequentemente, as discussões serão focadas nos resultados apresentados por Bello e Wood [17] e Gee *et al.* [43].

Allsopp [131] *apud* Gee *et al.* [43], em sua Tese de Doutorado, apresentou resultados referentes à influência da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio (v) (ou n) sobre o volume de desgaste (Figura 2.20 – Allsopp [131] *apud* Gee *et al.* [43]). Nesta, embora haja a afirmação de que o volume de desgaste é independente de v , pela Figura 2.20, é possível notar uma plausível diminuição do volume de desgaste, com o aumento da velocidade tangencial periférica da esfera. Os ensaios foram conduzidos em um equipamento de configuração esfera-fixa, sobre um corpo-de-prova de aço-ferramenta e com a adoção de partículas abrasivas de SiC (tamanho médio de 4 μm).

Figura 2.20. Comportamento do volume de desgaste, em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio. Corpo-de-prova de aço-ferramenta e partículas abrasivas de carbeto de silício (Allsopp [131] *apud* Gee *et al.* [43]). *Gráfico editado.*

Assim como Allsopp [131] *apud* Gee *et al.* [43], Bethke e Schiffmann [132] *apud* Gee *et al.* [43] também relataram um comportamento descendente do volume de desgaste, em função do aumento da rotação da esfera de ensaio (Figura 2.21 – Bethke e Schiffmann [132] *apud* Gee *et al.* [43]), para ensaios realizados em filmes finos de DLC (Diamond-Like Carbon) junto a partículas abrasivas de diamante, com tamanho médio de $1 \mu\text{m}$. A justificativa dada pelos pesquisadores foi que, devido aos experimentos terem sido conduzidos em um equipamento de configuração esfera-livre, o aumento da rotação do eixo de ensaio ocasionou um aumento gradual do escorregamento da esfera sobre o eixo.

Figura 2.21. Comportamento do volume de desgaste, em função da variação da rotação da esfera de ensaio. Revestimento de DLC e partículas abrasivas de diamante (Bethke e Schiffmann [132] *apud* Gee *et al.* [43]).

Tanto para a Figura 2.20, quanto para a Figura 2.21, as respectivas explicações dadas aparentam ser, a princípio, inconsistentes. Na Figura 2.20, é nítida a dependência de V com v e, na Figura 2.21, mesmo havendo escorregamento da esfera de ensaio sobre o eixo de ensaio, tal ocorrência não afetaria, significativamente, os resultados, visto que o comportamento de

$V = f(n)$ expressa uma explícita tendência descendente; mas, se isso for realmente fato, os resultados deveriam ser, a rigor, invalidados, devido à elevada ação do escorregamento entre “esfera/eixo” sobre os resultados.

Na Figura 2.22a [17] há o gráfico de $k = f(v)$, para revestimentos de poliamida 11. Até $v \cong 0,12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, o coeficiente de desgaste apresenta uma diminuição, em $v \cong 0,13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, k teve um aumento brusco e, em seguida, voltou a diminuir. Bello e Wood [17] apontam, como uma das causas, efeitos hidrodinâmicos entre a esfera e o revestimento. Além disso, como discutido por Lancaster [133], o aumento da temperatura no sistema tribológico pode influenciar este comportamento, devido a mudanças nos mecanismos de desgaste. Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 2.22b-d [17]) mostraram que, com o aumento de v , ocorreu um acréscimo na quantidade de partículas abrasivas incrustadas no corpo-de-prova [17]. Esta aderência pode ter sido decorrência do aumento da temperatura no tribo-sistema e, como consequência, ter ocasionado as alterações nos mecanismos de desgaste, o que justificaria o comportamento apresentado pelo coeficiente de desgaste.

Figura 2.22. (a) Comportamento do coeficiente de desgaste, em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio [17]. Incrustação de partículas abrasivas para diferentes valores de v : (b) 0,12 m/s ; (c) 0,13 m/s ; (d) 0,143 m/s [17]. $N = 6 \text{ N}$ e $S = 100 \text{ m}$.

Em resumo, neste tópico, foram organizados comportamentos decrescentes do desgaste em função do aumento da rotação do contra-corpo para três diferentes tipos de materiais: *i) metálico* (Figura 2.20), *ii) cerâmico* (Figura 2.21) e *iii) polimérico* (Figura 2.22). Entretanto, um ponto a ser questionado é se os resultados estão em Regime Permanente de Desgaste.

2.5.4. Concentração e tipo da pasta abrasiva

A literatura mostra que, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, a concentração e o tipo da pasta abrasiva desempenham um papel de influência decisiva, tanto na atuação dos modos de desgaste abrasivo [13,35,50,134] (que será discutido no Item 2.6.) quanto na quantidade de material removido [31,35,134,135], assunto deste tópico¹⁴.

Concentração da pasta abrasiva.

A Figura 2.23 [35] mostra um exemplo da variação do volume de desgaste em função da concentração da pasta abrasiva (em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa). O material abrasivo utilizado foi SiC, com tamanho médio de partícula de 4,25 μm , em água destilada, junto com esferas de aço para rolamento e corpos-de-prova de aço-ferramenta temperado (dureza de 7,75 GPa – 775 HV e composição química de 1% C, 1,2% Mn, 0,2% Si, 0,5% Cr, 0,15% V, 0,5% W, em massa), sob forças normais de 0,25, 0,5 e 1 N. Analisando-se os resultados, observa-se que, acima de 0,3% de SiC, quanto maior a força normal, maior o volume de desgaste; abaixo deste valor, o volume de desgaste foi praticamente insensível ao aumento de N , sendo dependente apenas do aumento de C .

¹⁴ Embora não seja o foco desta Tese, é importante mencionar que a norma ASTM G 105 – 89 [136] rege o ensaio que visa avaliar a ação de uma pasta abrasiva sobre o desgaste de materiais e, na Língua Inglesa, uma palavra-chave utilizada para designar esse tipo de ensaio é “abrasive slurry wear test” [137].

Figura 2.23. Volume de desgaste em função da porcentagem, em volume, de SiC. Ensaios realizados com esferas de aço para rolamento e corpos-de-prova de aço-ferramenta, sob cargas normais de 0,25 N, 0,5 N e 1 N [35].

Tipo da pasta abrasiva.

Além da quantidade de material abrasivo, Schiffmann *et al.* [135] alteraram, também, o tipo de fluido. Estes pesquisadores utilizaram partículas abrasivas de carbeto de silício (tamanho médio de 4,5 μm) e alumina (Al_2O_3) (tamanho médio de 1 μm) e, como fluido, água deionizada e glicerina¹⁵, sendo preparadas as seguintes composições (valores em volume): i) 20% SiC – 80% H_2O deionizada, ii) 20% SiC – 80% glicerina, iii) 10% Al_2O_3 – 90% H_2O deionizada e iv) 20% Al_2O_3 – 80% glicerina. Os ensaios foram realizados em revestimentos de nitreto de titânio, depositados (sob mesmas condições) sobre substratos de aço-ferramenta ASP 23 e liga de titânio Ti(Al,Mo), sendo todos os ensaios realizados de maneira a não ultrapassar os filmes finos. Na Figura 2.24 estão os resultados obtidos por Schiffmann *et al.* [135] e, na mesma, observa-se que o valor do coeficiente de desgaste está relacionado ao tipo de composto abrasivo.

¹⁵ Glicerina: Viscosidade Dinâmica – 1459 cP à 20°C / 934 cP à 25°C. Os ensaios descritos por Schiffmann *et al.* [135] foram conduzidos à temperatura de 21°C.

Figura 2.24. Valores de k para revestimentos de TiN, depositados sobre substratos de aço-ferramenta ASP 23 e liga de titânio Ti(Al,Mo), para diferentes pastas abrasivas e força normal de 0,2 N. Medições realizadas por microscopia óptica e perfilometria a laser [135].

A seguir, para uma melhor visualização, a Figura 2.24 foi modificada, de forma que, em cada análise, somente os resultados de interesse fossem destacados.

Na Figura 2.25, comparando os coeficientes de desgaste obtidos com “20% SiC – 80% H₂O deionizada” e “20% SiC – 80% glicerina” (substratos de aço-ferramenta ASP 23), observa-se que, no primeiro caso, a magnitude de k foi maior. Os pesquisadores Schiffmann *et al.* [135] apontam esta diferença devido ao maior coeficiente de atrito gerado com água deionizada do que com glicerina; é importante destacar que isto é apenas uma hipótese dos autores, não sendo publicados quaisquer valores de μ .

Figura 2.25. Coeficientes de desgaste obtidos com as pastas abrasivas “20% SiC – 80% H₂O deionizada” e “20% SiC – 80% glicerina”. Substrato: aço-ferramenta ASP 23 [135]. *Figura editada.*

Ainda sobre a Figura 2.24, com referência a ambos substratos, considere as pastas abrasivas “20% SiC – 80% H₂O deionizada”, “10% Al₂O₃ – 90% H₂O deionizada” e “20% Al₂O₃ – 80% glicerina” (Figura 2.26). Tomando-se como exemplo o composto “20% SiC – 80% H₂O deionizada” (Figura 2.26a), nota-se que os coeficientes de desgaste apresentaram, praticamente, os mesmos valores para os diferentes substratos. Como os ensaios foram realizados de forma a atuar somente sobre os filmes finos, estes resultados são, provavelmente, reflexos deste procedimento. As Figuras 2.26b e 2.26c são os resultados obtidos junto às pastas abrasivas “10% Al₂O₃ – 90% H₂O deionizada” e “20% Al₂O₃ – 80% glicerina”, respectivamente. Para estes compostos abrasivos, os valores de k dos filmes finos de TiN, depositados sobre os diferentes substratos, também estão, relativamente, próximos entre si, e a justificativa para este comportamento é idêntica à proposta mencionada no contexto da Figura 2.26a.

Figura 2.26. Valores de k em função do tipo de composto abrasivo: (a) “20% SiC – 80% H_2O deionizada”; (b) “10% Al_2O_3 – 90% H_2O deionizada”; (c) “20% Al_2O_3 – 80% glicerina” [135].

Figuras editadas.

Em relação às concentrações “20% SiC – 80% glicerina” e “20% Al₂O₃ – 80% glicerina”, a Figura 2.27 mostra que o desgaste foi maior quando adotado o carbeto de silício. Schiffmann *et al.* [135] não focaram essa questão, mas, na hipótese de que os diferentes substratos tenham apresentado efeitos idênticos sobre k , esta diferença se deve, basicamente, a três parâmetros relacionados às partículas abrasivas: *i*) durezas (valores não mencionados no trabalho), *ii*) formas (SiC: “angular” / Al₂O₃: “esférica”) e *iii*) tamanhos (SiC: 4,5 µm / Al₂O₃: 1 µm). Uma discussão detalhada, englobando o papel da dureza, forma e tamanho das partículas abrasivas sobre a quantidade de material removido, será apresentada no próximo item (2.5.5.).

Figura 2.27. Valores de k em função do tipo de material abrasivo (SiC e Al₂O₃); 80% de glicerina em ambos os casos [135]. *Figura editada.*

Schiffmann *et al.* [135] adotaram os adjetivos “angular” e “esférica” (“rounded”) para classificar as partículas abrasivas quanto às suas formas, mas, infelizmente, não expuseram nenhuma imagem destas, referenciando estes termos. Com o intuito de nortear o leitor sobre os adjetivos mencionados, a Figura 2.28 exhibe (sugere) o que seria, a princípio, tais formatos.

Figura 2.28. Partículas abrasivas: (a) SiC – forma “angular” [12]; (b) vidro – forma “esférica” [49].

É importante ressaltar que os valores de k apresentados na Figura 2.24 (e, nas subsequentes) foram obtidos a partir de diferentes distâncias de deslizamento, o que mostra a importância dos resultados estarem em Regime Permanente de Desgaste.

2.5.5. Influência das características “dureza”, “forma” e “tamanho” das partículas abrasivas sobre o comportamento ao desgaste

Dureza.

Com base no comportamento de $Q = f\left(\frac{H_A}{H_S}\right)$, em que H_A é a dureza do material abrasivo e, H_S , a dureza do material que sofre desgaste, foram definidos os “regimes de desgaste abrasivo”, sendo estes, classificados em “regime moderado”, se $\frac{H_A}{H_S} < 0,8$, e “regime severo”, se $\frac{H_A}{H_S} > 1,5$, para materiais metálicos polifásicos¹⁶ [138,139]. A Figura 2.29¹⁷ esquematiza a variação da taxa de desgaste em função de $\frac{H_A}{H_S}$.

¹⁶ Os valores “0,8” e “1,5” basearam-se em informações e Referências Bibliográficas contidas na Tese de Doutorado de G. Pintaúde [138].

¹⁷ O gráfico apresentado não se refere a resultados obtidos a partir de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

Figura 2.29. Relação esquemática entre a taxa de desgaste e o quociente H_A/H_S . *Figura adaptada.*

Na figura dada, embora a taxa de desgaste seja diretamente proporcional ao quociente H_A/H_S , os valores de Q envolvidos no regime severo são maiores que o observado no regime moderado de desgaste abrasivo.

No regime moderado, a dureza do material que sofre desgaste é sempre maior que a dureza do material abrasivo. Mantendo-se H_A constante e alterando-se o valor de H_S , observa-se que a variação de Q é relativamente baixa. Comportamento semelhante é observado na região de desgaste abrasivo severo, em que a dureza do material abrasivo é maior que 50% à dureza do material exposto ao desgaste. Mantendo-se H_S constante, é observada uma variação pouco significativa da taxa de desgaste com o aumento de H_A .

Embora nas regiões de “regime moderado” e “regime severo” de desgaste abrasivo, aumentos, ou diminuições significantes de H_A , ou H_S causem variações (aumento ou diminuição) de magnitudes relativamente menores da taxa de desgaste, há uma região de transição entre estes dois regimes, limitada pelos pontos $\frac{H_A}{H_S} \approx 0,8$ e $\frac{H_A}{H_S} \approx 1,5$, em que a taxa de desgaste é extremamente sensível à variação de $\frac{H_A}{H_S}$; pequenas alterações no valor deste quociente fazem com que a quantidade de material removido ascenda ou descenda de forma expressiva.

Forma.

Utilizando corpos-de-prova de PMMA, Kelly e Hutchings [64] analisaram a influência do formato da partícula abrasiva no volume de desgaste. Dentre os materiais

abrasivos incluídos na pesquisa, serão apresentados os resultados obtidos com sílica, de tamanhos médios 14,62 μm e 15,7 μm , e formas definidas como “faceted” e “blocky”, respectivamente [64]. O objetivo desta seleção foi fixar a dureza (coletando o mesmo material: sílica) e o tamanho (14,62 μm e 15,7 μm ¹⁸) das partículas abrasivas, de maneira que fosse possível avaliar somente a influência da forma das partículas abrasivas sobre o volume de desgaste. Em conjunto com uma força normal de 0,25 N, para cada tipo de forma, foi preparada a pasta abrasiva $0,4 \frac{\text{g}_{\text{S\acute{i}lica}}}{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O} - \text{Destilada}}$ e, ao invés de uma esfera, Kelly e Hutchings

[64] utilizaram um disco de nylon com 39 mm de diâmetro e 2,1 mm de espessura.

A Figura 2.30 apresenta os resultados obtidos por Kelly e Hutchings [64]. As imagens, ao lado de cada uma das curvas, exibem as formas “faceted” e “blocky”; em relação ao formato “blocky”, a foto refere-se à sílica, mas com tamanho médio de 152 μm .

Figura 2.30. Volume de desgaste em função do produto da distância de deslizamento pela força normal, para as formas “faceted” ($D_p = 14,62 \mu\text{m}$) e “blocky” ($D_p = 15,7 \mu\text{m}$) das partículas abrasivas [64]. *Figura editada.*

Pelos resultados publicados por Kelly e Hutchings [64] é possível afirmar que a forma das partículas abrasivas também dita a magnitude da taxa de desgaste. Não foi possível coletar resultados pertinentes a partículas abrasivas com os formatos sugeridos na Figura 2.28. Caso o pesquisador tenha interesse e necessidade em dar continuidade a este assunto, De Pellegrin e Stachowiak [140,141] conduziram simulações computacionais envolvendo a característica “forma” de partículas abrasivas.

¹⁸ O intuito foi selecionar os valores mais próximos entre si, atendendo a condição de mesmo material abrasivo com formatos diferentes.

Tamanho.

Dentre os trabalhos citados nas Referências Bibliográficas que tratam da influência do tamanho da partícula abrasiva sobre o comportamento ao desgaste [142-147], será apresentado um dos resultados obtidos por Sasada *et al.* [98] que, para pesquisarem este assunto, adotaram corpos-de-prova de alumínio, cobre, níquel e zinco, junto às partículas abrasivas de SiC, com tamanho médio entre 3 μm e 150 μm .

Basicamente, o princípio dos ensaios conduzidos por Sasada *et al.* [98] consistia de duas superfícies circulares submetidas a uma força normal de 15,7 N, nas quais, entre estas, eram inseridas as partículas abrasivas; enquanto uma permanecia em repouso, outra girava a uma velocidade tangencial periférica de $52,8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

Na Figura 2.31 estão os resultados obtidos com corpos-de-prova de cobre [98]. O coeficiente de desgaste foi linearmente proporcional ao tamanho médio das partículas abrasivas (D_p), até o mesmo atingir, o então denominado, “tamanho crítico” (D_c) [98,148], a partir do qual, a taxa de desgaste permanece constante, tornando-se, conseqüentemente, independente do tamanho das partículas abrasivas.

Figura 2.31. Variação do coeficiente de desgaste em função do tamanho das partículas abrasivas; superfícies de cobre e partículas abrasivas de SiC [98]. Gráfico editado.

Sinergia entre dureza, forma e tamanho das partículas abrasivas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

Até o momento, as características das partículas abrasivas foram analisadas de maneira individualizada, ou seja, o esforço foi organizar resultados provenientes da literatura que mantivessem duas características constantes e variassem somente uma, com a intenção de transmitir ao leitor, o conceito que a dureza, forma e tamanho desempenham sobre a quantidade de material removido. Entretanto, na discussão exposta há, basicamente, duas principais limitações: I) todos os resultados apresentados não se referem a ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa e II) a influência da interação entre duas ou três características não foi analisada. Com isso, a seguir, serão apresentados os resultados obtidos por Imbeni *et al.* [80], a partir de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, em que é estudada a sinergia entre a dureza, forma e tamanho das partículas abrasivas sobre o coeficiente de desgaste.

A Tabela 2.1 menciona as características (dureza, forma e tamanho) das partículas abrasivas adotadas por Imbeni *et al.* [80] e, a Figura 2.32, exibe imagens destes materiais. O “fator de circularidade” – F_c (“roundness factor” [75]), definido pela Equação 2.17, é utilizado para qualificar a angularidade (a forma) das partículas abrasivas¹⁹. A é a área projetada da partícula abrasiva e, p , o perímetro desta área [75]. Se $F_c = 1$, a projeção da partícula abrasiva é um círculo e, quanto mais a área projetada se afasta da forma “circular”, menor o valor de F_c [75].

Tabela 2.1. Características das partículas abrasivas utilizadas por Imbeni *et al.* [80].

Material abrasivo	Dureza – H_A [HV] [75]	Fator de circularidade – F_c	Tamanho – D_p [μm]	Denominação ⁽¹⁾
SiC	2600	0,73 $\pm$ 0,08	21,4 $\pm$ 8,6	SiC – 20
SiC	2600	0,67 $\pm$ 0,12	4,4 $\pm$ 1,4	SiC – 4
Al ₂ O ₃	2000	0,65 $\pm$ 0,16	20,4 $\pm$ 6,0	Al ₂ O ₃ – 20
Al ₂ O ₃	2000	0,51 $\pm$ 0,14	46,0 $\pm$ 5,5	Al ₂ O ₃ – 50

(1) Estas denominações serão utilizadas ao longo deste tópico. Algumas destas foram renomeadas em relação ao texto original de Imbeni *et al.* [80].

¹⁹ Além de “ F_c ” [75], os parâmetros “spike parameter-linear fit”, “spike parameter-quadratic fit” [48,49,149-153] e o desenvolvimento proposto por Gotoh e Finney [154] podem ser utilizados para classificar, qualitativamente, as formas das partículas abrasivas.

Figura 2.32. Partículas abrasivas utilizadas por Imbeni *et al.* [80]: (a) “SiC – 20”; (b) “Al₂O₃ – 20”; (c) “Al₂O₃ – 50”. Denominações conforme Tabela 2.1.

$$F_c = 4\pi \frac{A}{p^2} \quad (2.17)$$

A força normal foi de 0,05 N e, para todos os materiais abrasivos, os volumes destes nas composições das pastas abrasivas ficaram fixados em 10% [80]. Para a esfera, de aço (martensítico) para rolamento e $R = 14,95$ mm, foi estabelecida $v = 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Como corpo-de-prova, foi adotada a liga com memória de forma NiTi. A Figura 2.33 mostra sua microestrutura à temperatura ambiente, constituída, predominantemente, pela fase austenita cúbica (B2), além de, em uma quantidade relativamente menor, precipitados de Ni₃Ti, revelados por análises de difração de raios-X (radiação Cu K α , $\lambda = 0,15406$ nm) [80].

Figura 2.33. Microestrutura da liga com memória de forma NiTi, à temperatura ambiente [80].

Os resultados do coeficiente de desgaste em função do tipo de partícula abrasiva estão apresentados na Figura 2.34 [80].

Figura 2.34. Valores de k em função do tipo de partícula abrasiva [80]. *Figura editada.*

Nas discussões destes resultados, Imbeni *et al.* [80] afirmam os seguintes pontos: *i)* o coeficiente de desgaste, aparentemente, não foi influenciado pela dureza das partículas abrasivas, *ii)* o coeficiente de desgaste é inversamente proporcional à F_c e *iii)* o coeficiente de desgaste é diretamente proporcional ao tamanho das partículas abrasivas. As declarações de Imbeni *et al.* [80] serão analisadas com mais detalhes e, assim como foi feito no tópico anterior (2.5.4. *Concentração e tipo da pasta abrasiva*), a Figura 2.34 também sofrerá edições, de forma que sejam destacados apenas os resultados de interesse.

Inicialmente, a Tabela 2.2 sintetiza os valores das durezas das partículas abrasivas e do corpo-de-prova [80], assim como a relação H_A/H_S e a definição do regime de desgaste abrasivo, seguindo as Referências Bibliográficas da Tese de Doutorado de G. Pintaúde [138].

Tabela 2.2. Valores de H_A , H_S e a respectiva classificação do regime de desgaste abrasivo.

H_A [HV] [75]		H_S [HV] [80]		H_A/H_S	Regime de desgaste abrasivo
SiC	2600	Liga com memória de forma NiTi 224		11,6	Severo
Al ₂ O ₃	2000			8,9	Severo

Em todos os casos, o regime de desgaste abrasivo foi severo e, como discutido anteriormente, nesta região, mantendo-se H_S constante, grandes variações de H_A causam alterações na quantidade de material removido de magnitudes relativamente menores. Por este motivo, Imbeni *et al.* [80] estão corretos em afirmar que as diferentes durezas das partículas abrasivas, praticamente, não interferiram nos valores de k , além do que, as durezas do SiC e da Al₂O₃ estão relativamente próximas entre si (2600 HV e 2000 HV, respectivamente).

A Figura 2.35a focaliza os resultados obtidos com “SiC – 4” e “SiC – 20”, em que as maiores partículas abrasivas geraram o maior valor de k , como observado no trabalho de Sasada *et al.* [98]. Na Figura 2.35b está a comparação entre os coeficientes de desgaste gerados com “SiC – 20” e “Al₂O₃ – 20”. Ambos os materiais possuem, praticamente, o mesmo tamanho médio de partícula abrasiva, com o carbeto de silício apresentando um valor ligeiramente maior (mas, também, com um desvio-padrão maior) e, embora o SiC possua ainda maior dureza, o que pôde ter contribuído para que a alumina fornecesse um maior coeficiente de desgaste, foi seu menor fator de circularidade (0,65 contra 0,73 do carbeto de silício). Com isso, por estes resultados, os pesquisadores Imbeni *et al.* [80] fazem-se condizentes em concluir que o coeficiente de desgaste foi inversamente proporcional à F_c . Em relação aos resultados obtidos com “Al₂O₃ – 20” e “Al₂O₃ – 50” (Figura 2.35c), estes resultados também estão em concordância conceitual com o conteúdo exposto: as maiores partículas abrasivas conduziram ao maior coeficiente de desgaste; além disso, as partículas “Al₂O₃ – 20 μm ” possuem maior fator de circularidade, o que favoreceu a obtenção de um menor valor de k .

Figura 2.35. Comparação entre os valores de k para as partículas abrasivas (a) “SiC – 4” e “SiC – 20”, (b) “SiC – 20” e “Al₂O₃ – 20” e (c) “Al₂O₃ – 20” e “Al₂O₃ – 50” [80]. Figuras editadas.

Badisch e Mitterer [155] e Shipway e Hogg [156] também estudaram a influência da dureza e forma das partículas abrasivas sobre a taxa de desgaste, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. A opção foi pelo trabalho de Imbeni *et al.* [80] pois, neste, os resultados estão melhores expostos e discutidos.

2.6. Fenômenos envolvidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa

No item anterior, foi discutida a influência de cada um dos parâmetros de ensaio sobre o comportamento ao desgaste. Agora, serão apresentados fenômenos comumente observados. Dentre força normal, distância de deslizamento, rotação da esfera de ensaio, concentração da pasta abrasiva e características das partículas abrasivas, serão expostos fenômenos envolvendo N , C e D_p , sendo estes: i) transição entre os modos de desgaste abrasivo, ii) “ridging”, iii) “pile-up” e iv) “scuffing”. Na literatura referenciada, não foi encontrado qualquer trabalho que relacionasse n com algum fenômeno e, em relação à distância de deslizamento, o fenômeno relacionado a este parâmetro será discutido no Capítulo 4.

2.6.1. Transição entre os modos de desgaste abrasivo

Geralmente, em ensaios de desgaste micro-abrasivo, considera-se que o modo de desgaste a ser gerado é por rolamento. Porém, dependendo das condições de ensaio, pode-se ter a transição entre os modos de desgaste, de rolamento para riscamento, ou de riscamento para rolamento [35,46].

Utilizando esferas de aço para rolamento, corpos-de-prova de aço-ferramenta e diferentes materiais abrasivos, Trezona *et al.* [35] estudaram este comportamento. As Figuras 2.36a, 2.36b e 2.36c apresentam os resultados obtidos com partículas abrasivas de SiC (tamanho médio de 4,25 μm), Al_2O_3 (tamanho de 4,97 μm) e diamante (tamanho médio de 3,05 μm), respectivamente [35]. O modo de desgaste, para os diferentes compostos abrasivos, ficou em função da combinação entre a concentração da pasta abrasiva e a força normal aplicada [35].

Figura 2.36. Transição entre os modos de desgaste abrasivo, em função da concentração da pasta abrasiva e da força normal. Corpos-de-prova de aço-ferramenta, esferas de aço para rolamento e partículas abrasivas de (a) SiC ($D_p = 4,25 \mu m$), (b) Al_2O_3 ($D_p = 4,97 \mu m$) e (c) diamante ($D_p = 3,05 \mu m$) [35]. Em todos os compostos abrasivos, foi utilizada água destilada [35].

Nota-se que, para elevadas concentrações de pasta abrasiva, prevalece o desgaste abrasivo por rolamento e, para altas forças normais, predomina o desgaste abrasivo por riscamento [35,157]²⁰ e vice-versa. Este comportamento também foi comprovado por Mergler e Huis in ‘t Veld [31], em corpos-de-prova de materiais poliméricos, e por Sun *et al.* [157].

Nos três gráficos levantados, há uma região (central), em que os dois modos de desgaste ocorreram. Uma cratera de desgaste que representa esta região é referenciada pela Figura 2.6 [12,23,69,158], sendo atuante, em sua região central, desgaste abrasivo por

²⁰ Para se ter uma referência do que são considerados patamares “altos” e “baixos” de força normal e concentração de pasta abrasiva em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, $N = 5 \text{ N}$ e $v = 25\%$ de material abrasivo (em volume) são considerados valores elevados [35].

riscamento e, nas extremidades, micro-impressões, deixadas pelo desgaste abrasivo por rolamento [13,35].

Não é necessário que N e C sejam variados simultaneamente para que ocorra a transição entre os modos de desgaste abrasivo, bastando, apenas, a alteração de uma destas grandezas, como relataram Adachi e Hutchings [50] e Bello *et al.* [134]. A Figura 2.37a [134] apresenta o comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação do volume de partículas abrasivas na composição da pasta abrasiva. Para todos os corpos-de-prova (que não serão especificados neste texto), foram adotadas partículas abrasivas de Al_2O_3 , força normal de 0,25 N e distância de deslizamento de 180 m. Com o aumento de ϑ , a transição obedeceu a sequência “riscamento $\Rightarrow$ modo-misto $\Rightarrow$ rolamento”. Na Figura 2.37b, estão os resultados obtidos por Adachi e Hutchings [50], em que a concentração da pasta abrasiva foi mantida constante e a força normal, variada. Com um corpo-de-prova de aço-ferramenta e esfera de aço AISI 52100, junto às partículas abrasivas de carbeto de silício, com tamanho médio de $4,3\ \mu\text{m}$ e sob uma distância de deslizamento de 16 m, estes pesquisadores observaram que, com o aumento da força normal, o modo de desgaste abrasivo transitou de rolamento para riscamento.

Figura 2.37. Transição dos modos de desgaste abrasivo pela variação da (a) concentração da pasta abrasiva (N constante) [134] e (b) força normal (C constante) [50].

Além de N e C , a transição entre os modos de desgaste abrasivo também ocorre pela variação das seguintes grandezas: *i*) dureza da superfície (corpo-de-prova) (H_S), *ii*) dureza da esfera (H_E), *iii*) R , *iv*) coeficiente de Poisson do corpo-de-prova (ν_S), *v*) coeficiente de Poisson da esfera (ν_E), *vi*) módulo de elasticidade longitudinal do corpo-de-prova (E_S), *vii*) módulo de elasticidade longitudinal da esfera (E_E) e *viii*) D_P , como publicado por Adachi e Hutchings [13,50].

Com base nestas grandezas, Adachi e Hutchings [13,50] mapearam as atuações dos modos de desgaste abrasivo, pelo gráfico da severidade de contato (S_C), definida pela Equação 2.18, em função do quociente $\frac{H_S}{H_E}$ (Figura 2.38).

$$S_C = \frac{N \left(\frac{1}{H_S} + \frac{1}{H_E} \right)}{\pi \nu \sqrt[3]{ \left[0,75NR \left(\frac{1-\nu_S^2}{E_S} + \frac{1-\nu_E^2}{E_E} \right) \right]^2 + 2RD_P }} \quad (2.18)$$

A Equação 2.18 foi deduzida a partir do trabalho de Adachi e Hutchings [50] e do livro de I.M. Hutchings [75]. S_C é adimensional.

Figura 2.38. Atuações dos modos de desgaste abrasivo, em função da severidade de contato e da razão H_S/H_E [13,50].

Durante a elaboração desta Revisão Bibliográfica, realizou-se, por meio do programa Microsoft Excel, uma análise da Equação 2.18. Valores “reais” e “arbitrários” das grandezas constituintes da referida equação foram adotados, sendo constatado que nem todas as

variáveis desempenham a mesma influência sobre a transição entre os modos de desgaste abrasivo. Para expor este estudo, foram estabelecidos três níveis qualitativos de influência, “elevada”, “média” e “baixa”, nas quais as grandezas mencionadas foram classificadas (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Classificação qualitativa das influências das grandezas envolvidas na transição entre os modos de desgaste abrasivo.

Grandeza	Influência
N, ϑ	Elevada
R, D_P, H_S, H_E	Média
ν_S, ν_E, E_S, E_E	Baixa

Para o levantamento da Figura 2.38, foram realizados ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, adotando-se, como corpos-de-prova, PMMA, liga de alumínio S1C H4 e aço-ferramenta, com durezas de 0,22 GPa, 0,41 GPa e 7,75 GPa, respectivamente. As esferas foram de PP, bronze fosforoso e aço AISI 52100, com durezas de 0,062 GPa, 1,95 GPa e 9,9 GPa, respectivamente, sendo submetidas à $v = 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Em relação ao material abrasivo, optou-se pelo SiC, com tamanho médio de partícula de 4,3 μm ; as concentrações das pastas abrasivas variaram de $\vartheta = 0,003$ a $\vartheta = 20\%$ SiC e, as cargas normais, de 0,01 a 1 N. A distância de deslizamento, para todos os experimentos, foi de 16 m.

2.6.2. “Ridging”

No Item 2.5.1. (*Força normal*), foi afirmado que a taxa de desgaste é linearmente proporcional à força normal. Entretanto, dependendo das condições de ensaio e dos materiais envolvidos, a partir de certo ponto, pode haver a diminuição de Q com o aumento de N , devido à ocorrência de “ridging”.

Em termos práticos, “ridging” é o contato direto entre a esfera e o corpo-de-prova, que acontece quando a “camada” de partículas abrasivas (ilustrada na Figura 2.7) deixa de atuar. Geralmente, “ridging” ocorre na região central da cratera de desgaste, em consequência da elevada “pressão de contato”²¹ [43,75], o que dificulta, ou veta, por completo, a penetração

²¹ O termo “tensão de Hertz” foi substituído por “pressão de contato”, uma vez que, na prática, há dificuldades em garantir que o contato é Hertziano.

de partículas abrasivas. A Figura 2.39a [39] esquematiza este fenômeno e a Figura 2.39b [43] exibe a imagem de uma cratera de desgaste em que se formaram “ridges”. É importante conceituar que “ridging” é o fenômeno, o contato físico “esfera/corpo-de-prova” e “ridge”, o resultado deste fenômeno²².

Figura 2.39. (a) Princípio do fenômeno “ridging” [39]; (b) “ridges” formados na cratera de desgaste [43].

O conceito geral diz que “ridging” ocorre sob elevadas forças normais, mas isto não é verdade absoluta. A literatura desta Tese referencia resultados, em que ensaios foram conduzidos sob cargas normais consideradas relativamente altas e os autores não relataram sua ação. A força normal é um fator primordial para a formação de “ridges”, mas os instantes iniciais de um ensaio e as condições superficiais da esfera podem ser as condições determinantes entre o fenômeno atuar, ou não. Allsopp *et al.* [39] concluíram que, para esferas de aço para rolamento (dureza, geralmente da ordem de 1080 HV), a formação de “ridge” pode ser evitada com a adoção de esferas já “utilizadas”, que apresentem um determinado nível de desgaste superficial. Estes pesquisadores defendem a idéia de que, no início do ensaio, há um tempo em que a esfera desliza sobre o corpo-de-prova sem a atuação das partículas abrasivas e, durante este período, se a esfera de ensaio estiver sem uso, a pasta abrasiva flui para as laterais do contato “esfera/corpo-de-prova”, devido ao acabamento superficial (polido) da mesma [39]. Talvez, este problema possa ser resolvido, inserindo, antes do início do ensaio, uma camada de partículas abrasivas sobre o corpo-de-prova, ou realizando ensaios submersos na pasta abrasiva, ao invés de gotejá-la.

A Figura 2.40a [56,159] exibe uma cratera de desgaste que sofreu a atuação de “ridging” e a Figura 2.40b é um corte na secção transversal de um “ridge” que se formou em seu centro. É possível notar que, no “ridge” em si, não houve remoção de material, ou foi bem menos acentuada (ocorrendo diretamente pela esfera de ensaio) que nas regiões adjacentes, em que as partículas abrasivas agiram e, no caso, ocasionaram desgaste abrasivo por

²² “Ridging” provém do verbo “to ridge”, que pode ser traduzido como “marcar com” (“to mark with”). O substantivo “ridge” pode ser definido como “crista”, “elevação”. Estas traduções foram retiradas de “The American Heritage Dictionary” [3].

rolamento (Figura 2.40c). A Figura 2.40d exibe o final de um “ridge”, na borda da cratera de desgaste da Figura 2.40a. Por estas figuras, é possível afirmar que “ridges”, realmente, são “cristas” (“elevações”), ocasionadas devido à não-remoção de material pelas partículas abrasivas.

Figura 2.40. (a) Atuação de “ridging” em uma cratera de desgaste; (b) corte na secção transversal de um “ridge”; (c) desgaste abrasivo por rolamento nas regiões adjacentes ao “ridge”; (d) final de um “ridge”, na borda da cratera de desgaste. As imagens (b), (c) e (d) referem-se à cratera de desgaste (a) [56].

Ainda em relação à Figura 2.40, é possível questionar que, sob a ação de “ridging”, parcelas significativas da pressão de contato ficam suportadas pelas próprias regiões de ocorrência deste fenômeno, diminuindo, assim, a pressão nas regiões adjacentes da cratera de desgaste e, ocasionando, conseqüentemente, desgaste abrasivo por “rolamento”. A questão da relação entre pressão e atuações dos modos de desgaste abrasivo será enfatizada no Capítulo 4.

A Figura 2.41a [56,159] mostra o perfil da cratera de desgaste exibida na Figura 2.40a [56,159]. Analisando-se em conjunto estas figuras, é possível relacionar as marcas de “ridges” observadas na imagem da cratera de desgaste com seu perfil, mas trata-se de uma suposição, pois não é conhecido o ponto exato em que Shipway e Hodge [56] seccionaram a mesma. Este perfil pode ser explicado pelas Figuras 2.41b e 2.41c [56]; a partir de um determinado ponto, as partículas abrasivas tomam caminhos preferenciais e, então, não são

capazes de atuar entre a esfera e o corpo-de-prova, provocando o contato direto entre estes dois elementos e, consequentemente, acarretando a formação de “ridges”.

Figura 2.41. (a) Perfil da cratera de desgaste exibida na Figura 2.40a; (b) caminhos percorridos pelas partículas abrasivas; (c) contato entre a esfera e o corpo-de-prova [56].

A consequência da formação de “ridges” é a diminuição de taxa de desgaste com o aumento da força normal, como relataram Shipway e Hodge [56], Shipway e Ngao [160] e Jones [161]. Na Figura 2.42 tem-se um gráfico da taxa de desgaste, em função da força normal [56], em que os pontos identificados com “ r ” denotam a atuação de “ridging”. Nos ensaios sem este fenômeno, pode-se considerar que a taxa de desgaste variou linearmente com a força normal, como conceituou o Item 2.5.1.; porém, a partir do momento em que “ridges” começaram a se formar, o volume de desgaste diminui e, por consequência, a taxa de desgaste. Para estes ensaios, Shipway e Hodge [56] utilizaram um corpo-de-prova de vidro comum e esferas de aço AISI 52100, com partículas abrasivas de carbeto de silício de tamanho médio 4 μm e $\vartheta = 13,8\%$.

Figura 2.42. Comportamento da taxa de desgaste, em função da força normal. Os pontos denotados com “r” indicam ocorrência de “ridging” [56].

Além da análise isolada da força normal (Figura 2.42), Shipway e Hodge [56] pesquisaram a influência da concentração da pasta abrasiva (Figura 2.43) e da interação entre N e C (Figura 2.44) sobre a formação de “ridges”.

Figura 2.43. Comportamento da taxa de desgaste, em função da concentração da pasta abrasiva. Os pontos denotados com “r” indicam ocorrência de “ridging” [56].

Figura 2.44. Interação entre força normal e concentração da pasta abrasiva na formação de "ridge" [56].

Para as análises das Figuras 2.43 e 2.44, inicialmente, será postulada a seguinte hipótese: i) *o processo de desgaste deve estar, necessariamente, compreendido em condições de desgaste abrasivo por riscamento para que ocorram formações de "ridges"*. Esta argumentação considera cancelada a probabilidade que a atuação de "ridging" esteja vinculada às condições pertinentes ao campo de desgaste abrasivo por rolamento.

A Figura 2.43 mostra que as baixas concentrações de pasta abrasiva favoreceram o surgimento de "ridging", o que são resultados de perfeita concordância qualitativa com os gráficos apresentados nas Figuras 2.36 e 2.38, em que baixos valores de ϑ suportam o modo riscamento. Com isso, pode-se considerar, a princípio, a hipótese, deferida.

O mapeamento exibido na Figura 2.44 reforça a hipótese estabelecida, visto que, no campo de elevadas concentrações de pasta abrasiva e baixas forças normais, predominou, unanimemente, a condição de *não-formação de "ridges"*, também observada por Buchanan e Shipway [162] e, sob condições contrárias, com o aumento de N e diminuição de C , os ensaios transitaram para condições que favoreceram a atuação de "ridging". Novamente, confrontando a Figura 2.44 com as Figuras 2.36 e 2.38, conclui-se que todos os resultados estão em concordância qualitativa entre si: o modo riscamento e, consequentemente, "ridges", são diretamente influenciados pelo aumento de N e diminuição de C .

Comparando a pesquisa de Allsopp *et al.* [39] com a hipótese rogada, há um confronto de idéias: Allsopp *et al.* [39] defendem o conceito de que os pontos culminantes para as formações de "ridges" são o acabamento superficial da esfera de ensaio e os instantes iniciais do ensaio. Neste tópico, com base nos resultados de Shipway e Hodge [56], foi lançada a idéia de que, para haver a atuação de "ridging", o processo deve estar situado na

região de desgaste abrasivo por riscamento. Entretanto, há duas controvérsias: *i)* o acabamento superficial da cratera de desgaste e o provável fluxo de pasta abrasiva para as laterais da interface “corpo-de-prova/esfera” não dependem em que condição está compreendido o processo de desgaste e *ii)* os próprios resultados de Shipway e Hodge [56] revelam a atuação de desgaste abrasivo por rolamento ao lado de “ridges” (Figuras 2.40c e 2.40d).

Mesmo com a ação de “ridging”, o volume da cratera de desgaste ainda pode ser medido por interferometria a laser (por exemplo); a limitação volta-se para a impossibilidade de uso da Equação 2.1b, visto que, com as formações de “ridges”, é inviável considerar que a cratera possua formato semi-esférico.

O aparecimento de “ridging” nunca é desejado em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, mas pode ser importante, para um aprofundamento maior do assunto, pesquisar este choque de argumentos.

2.6.3. “Pile-up”

Este fenômeno é caracterizado e pode ser definido pela elevação de material acima da superfície do corpo-de-prova, como mostra a Figura 2.45 [135]. A Figura 2.45a é uma imagem, obtida por interferometria a laser, de uma cratera de desgaste e, a Figura 2.45b, seu perfil, em que é observado material sobressalente à superfície (“pile-up”).

Figura 2.45. (a) Cratera de desgaste com ocorrência de “pile-up”; (b) perfil da cratera de desgaste (a) [135].

Somente Schiffmann *et al.* [135] relataram o “pile-up” em ensaios (não-perfurantes) conduzidos sobre filmes finos de TiN. Os autores deram pouca ênfase a este assunto, não pesquisando a interação entre “pile-up”, distância de deslizamento e força normal para o material abrasivo utilizado, mas mencionam que este fenômeno pode estar relacionado com a deformação plástica sofrida pelo material, tendo sido observado em materiais dúcteis como alumínio (Al), ouro (Au) e prata (Ag).

2.6.4. “Scuffing”

Diferente do conceito estabelecido para definir o “desgaste adesivo” ocasionado pela falha de lubrificação “elasto-hidrodinâmica” entre dois elementos [75,165-167] em movimento relativo, “scuffing”, em desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, são riscos que ocorrem na borda da cratera de desgaste, na direção de deslizamento da esfera de ensaio. A Figura 2.46 mostra a borda de uma cratera de desgaste, gerada em aço-ferramenta revestida com nitreto de titânio [43], em que é relatada a ocorrência deste fenômeno.

Figura 2.46. Atuação de “scuffing” [43].

Na Figura 2.47 [61] estão definidos os diâmetros “ d ” e “ d_s ” em uma cratera de desgaste que sofreu “scuffing”. A dimensão “ d ” foi definida na Figura 2.3 e, “ d_s ”, é o diâmetro aparente da cratera de desgaste, que considera o “scuffing”. A rigor, “ d_s ” é um valor superestimado de “ d ”.

Figura 2.47. Ocorrência de “scuffing”. Definição dos diâmetros “ d ” e “ d_s ” [61]. A linha branca traçada na cratera de desgaste representa o plano de corte utilizado na análise de seu perfil.

Trezona e Hutchings [61], por meio das Equações 2.19 e 2.20, estabeleceram condições para que, em casos de atuação de “scuffing”, o diâmetro “ d ” possa ser definido com precisão. As unidades devem estar em “mm”.

$$d = \frac{d_s - 0,1407}{0,9358} \quad \text{para } 0,5 \text{ mm} \leq d_s \leq 2,193 \text{ mm} \quad (2.19)$$

$$d = d_s \quad \text{para } d_s > 2,193 \text{ mm} \quad (2.20)$$

Para $d_s < 0,5 \text{ mm}$, as crateras de desgaste não são esféricas [61] e, assim, não são recomendadas a medição do diâmetro “ d ” por microscopia óptica e as aplicações das Equações 2.1 e 2.2 para os cálculos da profundidade e do volume da cratera de desgaste, respectivamente.

O “scuffing” é um fenômeno ainda não completamente compreendido pela comunidade científica. Entretanto, Trezona e Hutchings [61] deixam implícito que, provavelmente, o mesmo ocorra, somente, quando a dureza do corpo-de-prova for menor que a dureza da esfera.

2.7. Embasamento conceitual sobre a movimentação das partículas abrasivas

O contato entre duas superfícies inclui interações mecânicas, triboquímicas e transferência de material entre as mesmas [163], sendo envolvidas diferentes formas de energia. Em desgaste abrasivo, são observadas três maneiras pelas quais a energia é dissipada [164]: *i*) energias cinética e potencial, relacionadas aos fragmentos de desgaste (além da energia acumulada pela superfície desgastada), *ii*) energia sonora e *iii*) aquecimento (por atrito) das superfícies.

Durante o desgaste de uma superfície, os dois movimentos que uma partícula abrasiva pode apresentar são de “deslizamento” ou “rolamento”, provocando desgaste abrasivo por “riscamento” ou “rolamento”, respectivamente, como visto na Seção 2.2.2.. É sensato supor que a magnitude de cada uma das energias definidas esteja diretamente relacionada ao tipo de movimento das partículas abrasivas e o objetivo deste tópico é fundamentar, de forma sintetizada, as teorias de movimentação das partículas abrasivas apresentadas por “J.A. Williams & A.M. Hyncica” e “K. Adachi & I.M. Hutchings”.

Teoria de J.A. Williams & A.M. Hyncica.

Williams e Hyncica [168,169] modelaram²³ uma possível movimentação das partículas abrasivas durante o processo de desgaste em que, com base nesta locomoção, é gerado desgaste abrasivo por “rolamento” ou “riscamento”.

Inicialmente, Williams e Hyncica [168] idealizaram uma partícula abrasiva piramidal de base triangular, com dimensões D_p^M e χ (Figura 2.48 [13]). D_p^M é a diagonal maior da partícula sugerida, χ equivale a 55° (a razão da escolha deste valor está relacionada a parâmetros geométricos do formato esquematizado) e D_{ES} é a distância entre as superfícies.

Figura 2.48. Partícula abrasiva formatada por Williams e Hyncica [13,168,169].

Segundo os autores, para $\frac{D_p^M}{D_{ES}} \leq 1,74$, atua desgaste abrasivo por “rolamento” e, para

$\frac{D_p^M}{D_{ES}} > 1,74$, desgaste abrasivo por “riscamento” [168]. De forma generalizada, tem-se que:

se $\frac{D_p^M}{D_{ES}} > \sec(\chi) \Rightarrow$ desgaste abrasivo por rolamento;

se $\frac{D_p^M}{D_{ES}} < \sec(\chi) \Rightarrow$ desgaste abrasivo por riscamento.

²³ Este modelamento não se baseou em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, mas fundamentou a pesquisa posterior de Adachi e Hutchings [13].

Teoria de K. Adachi & I.M. Hutchings.

Em relação a ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, a conceituação publicada por Adachi e Hutchings [13] mostra-se mais eficaz em termos práticos, já que a mesma foi elaborada para este tipo de ensaio. Com base no trabalho de Williams e Hyncica [168], Adachi e Hutchings [13] elaboraram o gráfico da Figura 2.38, em que a severidade de contato (definida pela Equação 2.18) e a relação $\frac{H_S}{H_E}$ presumem o tipo de movimento das partículas abrasivas.

Inicialmente, Adachi e Hutchings [13] estabeleceram as seguintes Condições de Contorno:

- (1) O efeito hidrodinâmico da pasta abrasiva é desprezível, uma vez que a velocidade tangencial da esfera de ensaio e a viscosidade da própria pasta gera um filme de espessura muito menor que D_{ES}^{24} ;
- (2) Todas as partículas abrasivas são esféricas de diâmetro D_p (sendo $D_p = D_p^M$);
- (3) A quantidade de partículas abrasivas, na área de contato “esfera / corpo-de-prova”, é proporcional à concentração da pasta abrasiva;
- (4) A força normal é distribuída de maneira uniforme entre as partículas abrasivas atuantes entre a esfera e o corpo-de-prova;
- (5) A dureza das partículas abrasivas é muito maior que as durezas da esfera e do corpo-de-prova, de forma que as mesmas se mantêm indeformadas durante a geração do desgaste;
- (6) As rugosidades das superfícies da esfera e do corpo-de-prova são desprezíveis, quando comparadas à D_p .

A Figura 2.49 esquematiza a atuação de uma partícula abrasiva definida por Adachi e Hutchings [13], submetida à ΔN , a força normal que age sobre uma única partícula abrasiva. D_S é a profundidade de penetração da partícula abrasiva no corpo-de-prova e, D_E , a

²⁴ O modelo publicado por Williams e Hyncica [168] é válido quando a distância de separação entre o corpo-de-prova e o contra-corpo é relativamente pequena, comparável a valores observados em ensaios “ball-cratering”. Porém, Trezona *et al.* [39] enfatizam que, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, as superfícies não estão sujeitas às pressões desenvolvidas nos ensaios conduzidos por Williams e Hyncica [168], em que D_{ES} é estabelecida por condições hidrodinâmicas de lubrificação; a separação entre a esfera e o corpo-de-prova está relacionada com a força normal e à concentração da pasta abrasiva (*i.e.*, à quantidade de partículas atuantes no processo de desgaste).

profundidade de penetração da partícula abrasiva na esfera de ensaio. Estes pesquisadores consideraram que a partícula abrasiva está provida, unicamente, de movimento de translação e, devido ao seu deslizamento, é provocado riscamento no corpo-de-prova, sendo a área frontal que entra em contato com o material, definida pela Equação 2.21 [13,170]. Neste modelamento, é desconsiderada qualquer deformação (“elástica” ou “plástica”) da partícula abrasiva.

Figura 2.49. Atuação de uma partícula abrasiva de diâmetro D_P submetida à ΔN [13].

$$A_f = \frac{\pi D_P D_S}{2} \quad (2.21)$$

Com base no conceito de que a dureza (H) de um material é definida por $H = \frac{N}{A_{pi}}$ [171], em que A_{pi} é a área projetada da impressão proveniente do indentador, a profundidade de penetração da partícula abrasiva no corpo-de-prova pode ser estabelecida pela Equação 2.22 e a profundidade de penetração da partícula abrasiva na esfera de ensaio, pela Equação 2.23.

$$D_S = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P H_S} \quad (2.22)$$

$$D_E = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P H_E} \quad (2.23)$$

A distância entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio (D_{ES}) é dada pela equação $D_{ES} = D_P - D_S - D_E$ e, substituindo as Equações 2.22 e 2.23 nesta, chega-se à Equação 2.24.

$$D_{ES} = D_P - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P H_S} - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P H_E} \quad (2.24)$$

Sendo $\frac{1}{H_S} + \frac{1}{H_E} = \frac{1}{H^*}$ e colocando-se o termo $\frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P}$ em evidência, D_{ES} torna-se (Equação 2.25):

$$D_{ES} = D_P - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta N}{D_P H^*} \quad (2.25)$$

Pelas Condições de Contorno (3) e (4), a I) *quantidade total de partículas abrasivas sobre a área da cratera de desgaste* (Θ) e a II) *força normal, agindo sobre cada partícula abrasiva* são dadas pelas Equações 2.26 e 2.27, respectivamente. A_1 é a área projetada da cratera de desgaste formada por uma rotação da esfera de ensaio.

$$\Theta = \frac{A_1 \vartheta}{\pi D_P^2} \quad (2.26)$$

$$\Delta N = \frac{\pi N D_P^2}{A_1 \vartheta} \quad (2.27)$$

Substituindo a Equação 2.27 na Equação 2.25, D_{ES} fica (Equação 2.28):

$$D_{ES} = D_P \left(1 - 2 \frac{N}{A_1 \vartheta H^*} \right) \quad (2.28)$$

Como $D_P = D_P^M$, a partir da Equação 2.28, pode-se ter a igualdade estabelecida pela Equação 2.29.

$$\frac{D_P^M}{D_{ES}} = \frac{1}{1 - 2 \frac{N}{A_1 \vartheta H^*}} \quad (2.29)$$

A condição crítica de transição entre os modos de desgaste abrasivo, que ocorre para um determinado valor de $\frac{D_P}{D_{ES}}$, ocorre, também, para valores especificados de $\frac{N}{A_1 v H^*}$. Este é o conceito em que está baseado o gráfico da Figura 2.38.

Sendo $A_1 = \pi \left(\frac{b_1}{2} \right)^2 = \pi (r_{Hertz}^2 + 2RD_P)$, em que b_1 é o diâmetro da cratera de desgaste,

formada por uma rotação da esfera de ensaio e, r_{Hertz} , o raio de contato de Hertz, deduz-se a Equação 2.18. A Figura 2.50a [13] exemplifica as grandezas b_1 e r_{Hertz} , para uma esfera de aço AISI 52100, corpo-de-prova de PMMA, partículas abrasivas de SiC com tamanho médio de $4,3 \mu m$ e força normal de $0,2 N$. A área calculada a partir de r_{Hertz} foi denominada “área inicial de contato” e, com b_1 , “área inicial de interação”. Na Figura 2.50b [13] tem-se, de forma esquematizada, b_1 e r_{Hertz} .

Figura 2.50. (a) Exemplificação das grandezas b_1 e r_{Hertz} (ensaios realizados com esfera de aço AISI 52100, corpo-de-prova de PMMA, partículas abrasivas de SiC com tamanho médio de $4,3 \mu m$ e força normal de $0,2 N$); (b) esquematização geométrica de b_1 e r_{Hertz} [13].

Em toda a dedução conduzida por Adachi e Hutchings [13], é importante ressaltar que a Equação 2.18 foi formalizada considerando que as partículas abrasivas são esféricas e geram desgaste abrasivo por riscamento. Na prática, geralmente, estas condições não estarão necessariamente presentes, mas, a equação de Adachi e Hutchings [13] permite considerar fatores que influenciam o comportamento ao desgaste micro-abrasivo. Tais fatores, mencionados e classificados qualitativamente quanto ao nível de influência na Tabela 2.3, não podem ser inseridos no modelo de Williams e Hyncica [168].

2.8. Mecanismos de desgaste abrasivo

Ao contrário do movimento de rolamento, o deslizamento agrega locomoções ordenadas de partículas abrasivas, como observaram da Silva *et al.* [46,47]. A Figura 2.51a [46] exibe a superfície de um corpo-de-prova submetido a ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, junto às partículas abrasivas de hematita (Fe_2O_3) (“pontos brancos”), com tamanho médio de $0,92\ \mu\text{m}$. É possível notar que as partículas abrasivas estão alinhadas, indicando que as mesmas geraram riscos na cratera de desgaste. Na Figura 2.51b [46] está a distribuição granulométrica da Fe_2O_3 .

Figura 2.51. (a) Alinhamento das partículas abrasivas sob desgaste abrasivo por riscamento [46]; (b) distribuição granulométrica das partículas abrasivas de (a) [46].

Considerando uma partícula abrasiva deslizando sobre uma superfície (Figura 2.52 [172]), causando, portanto, desgaste abrasivo por riscamento, em função dos materiais envolvidos e das condições de ensaio, podem ser observados quatro mecanismos de desgaste: i) “*ploughing*”, ii) “*side-fin*”, iii) “*wedge*” e iv) “*cutting*” [75,102,173-184].

Figura 2.52. Ação de uma partícula abrasiva sobre uma superfície [172].

Conceitualmente, o “ploughing” não ocasiona perda de material, apenas deformação plástica, em que o mesmo é transferido para as laterais do trajeto realizado pela partícula abrasiva [185] e, conseqüentemente, $Q = 0$ [186]. Por outro lado, “cutting” é o mecanismo de desgaste de maior severidade, causando uma taxa relativamente elevada de geração de cavacos [187], *i.e.*, altas taxas de desgaste [188]. Quanto ao nível de desgaste que podem provocar, os mecanismos “side-fin” e “wedge” estão entre o “ploughing” e o “cutting” [187].

Qualitativamente, a agressividade com que cada um dos mecanismos de desgaste abrasivo remove material pode ser representada pela Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Classificação qualitativa da ação dos mecanismos de desgaste abrasivo.

Mecanismo	Severidade	Material removido
Cutting		1 ^(*)
Wedge		⋮
Side-fin		⋮
Ploughing		0

(*) Classificação arbitrária.

A Figura 2.53 [187,189] exhibe, de forma esquemática, as vistas longitudinais e transversais dos quatro mecanismos de desgaste abrasivo, assim como, imagens clássicas das atuações de cada um dos mecanismos [189].

Figura 2.53. Vistas longitudinais, frontais (esquemáticas) e geração dos mecanismos de desgaste abrasivo (a) “ploughing”, (b) “side-fin”, (c) “wedge” e (d) “cutting” [187,189].

Seccionando, transversalmente, uma ranhura (Figura 2.54 [190]), pode-se definir as áreas A^* e A^{**} , de forma que o “grau de desgaste” (δ) é definido pela Equação 2.30 [175,185,191,192]. Para o “ploughing”, $A^* = 2A^{**}$ e, conseqüentemente, $V = 0$.

Figura 2.54. Definição das áreas A^* e A^{**} [190].

$$\delta = \frac{A^* - 2A^{**}}{A^*} \quad (2.30)$$

Na literatura, os mecanismos de desgaste abrasivo “ploughing”, “side-fin”, “wedge” e “cutting” são relacionados ao desgaste abrasivo por riscamento. Em relação à remoção de material por desgaste abrasivo por rolamento, Axén *et al.* [100] destacam dois mecanismos: “cutting” e “micro-fadiga”, que ocorre devido ao rolamento repetitivo de partículas abrasivas sobre a superfície em desgaste, *i.e.*, desgaste por deformação plástica [193]. No geral, os mecanismos de desgaste predominantes são o “ploughing” e o “cutting”, sendo o primeiro, fortemente dependente da forma da partícula abrasiva que, por sua vez, pode agir sobre o coeficiente de atrito, como será discutido no próximo item (2.9. *Coeficiente de atrito*).

Cada um dos mecanismos de desgaste abrasivo mencionados podem ser analisados com base na teoria de “slip line fields”, que não será detalhada neste texto, pois foge do escopo da pesquisa proposta. Entretanto, dentre os trabalhos nesta linha, cita-se, principalmente, as publicações de Bressan e Williams [194], Challen e Oxley [174], Hutchings [75,102] e Kato [192].

Os mecanismos de desgaste abrasivo “ploughing”, “side-fin”, “wedge” e “cutting” ocorrem por *deformação plástica* [75], em materiais dúcteis. Em materiais de comportamento frágil, além destes quatro mecanismos, que agem de forma desprezível, atua, por *fratura frágil*, o “micro-trincamento” [75], sendo efetivado quando ΔN excede a tenacidade à fratura do material submetido a desgaste.

O estudo da nucleação e propagação de trincas em materiais frágeis, decorrentes das ações de partículas abrasivas, é relativamente complexo e, não sendo tema desta Tese de Doutorado, não será discutido detalhadamente. Entretanto, para o pesquisador interessado, são indicadas as publicações de Arora *et al.* [195], Swain e Lawn [196] e Zum Gahr [139].

2.9. Coeficiente de atrito

2.9.1. Definições

Assim como a taxa e o coeficiente de desgaste, o “coeficiente de atrito” (μ) não é uma propriedade dos materiais, mas sim, uma resposta do tribo-sistema [119], *i.e.*, dos materiais envolvidos e das condições a que são submetidos. Os mesmos materiais podem apresentar diferentes coeficientes de atrito em situações distintas.

Classicamente, o coeficiente de atrito é definido pela Equação 2.31, em que T é a força tangencial²⁵ desenvolvida.

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (2.31)$$

Há dois tipos de coeficiente de atrito: i) *coeficiente de atrito estático* (μ_e), cujo valor máximo ocorre, quando o objeto está na iminência de movimento e ii) *coeficiente de atrito cinético* (μ_c), observado quando um corpo está em movimento [197]. A Figura 2.55 exhibe, esquematicamente, um possível comportamento de μ_e e μ_c .

Figura 2.55. Comportamento esquemático de μ_e e μ_c .

O coeficiente de atrito pode ser interpretado como “a oposição que um material tem a deslizar sobre outro” e esta divergência é diretamente proporcional a μ , *i.e.*, maiores valores de μ correspondem a maiores dificuldades de deslocamento.

²⁵ Nesta Tese, será utilizado o termo “força tangencial”, ao invés de “força de atrito”.

2.9.2. *Leis do Atrito*

Observando que diferentes pares de materiais, impostos a diferentes condições de ensaio, geravam valores aproximadamente constantes de μ_c , Guillaume Amontons, em 1699, formulou as duas primeiras “Leis do Atrito” (embora Leonardo di ser Piero da Vinci as tenha postulado 200 anos antes) [75,198,199]:

- (1) A força tangencial é diretamente proporcional à força normal;
- (2) A força tangencial é independente da área aparente de contato.

Finalmente, em 1785, Charles-Augustin de Coulomb descreveu a terceira lei do atrito [75,199]:

- (3) A força tangencial é independente da velocidade de deslizamento.

Embora Leonardo da Vinci, Amontons e Coulomb, em suas épocas, não dispunham dos recursos tecnológicos, hoje presentes, os enunciados postulados por estes cientistas são totalmente aceitos e aplicados pela comunidade científica contemporânea.

2.9.3. *Parâmetros de influência sobre o coeficiente de atrito*

Atualmente, há diversos estudos que enfatizam o coeficiente de atrito, em diferentes configurações de equipamentos, condições de ensaio, materiais envolvidos e finalidades científicas e tecnológicas, podendo, em geral, ser observada uma variação entre 0,1 e 1,1 [200-248]; dependendo da situação, em pesquisas envolvendo borracha, o coeficiente de atrito pode ser maior que 4. Em relação ao desgaste abrasivo, na literatura referenciada, os valores do coeficiente de atrito estão compreendidos entre 0,2 e 0,8, aproximadamente [105,249-256], sendo relatados, também, trabalhos que propõem modelos e teorias sobre o coeficiente de atrito desenvolvido em sistemas tribológicos abrasivos [144,257-264], além de outros que enfatizam a influência dos mecanismos de desgaste (definidos no Item 2.8.) sobre o comportamento de μ [180,184,187,192,194,265,266].

Como mencionado no Item 2.1. e discutido no Item 2.5., em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, os parâmetros que podem ser definidos são: *i*) força normal, *ii*) distância de deslizamento, *iii*) diâmetro da esfera de ensaio, *iv*) rotação da esfera

de ensaio, v) concentração da pasta abrasiva, vi) viscosidade do fluido da pasta abrasiva, vii) características (dureza, forma e tamanho) das partículas abrasivas e a viii) vazão do composto abrasivo. A revisão literária referente à grandeza física “coeficiente de atrito”, selecionou pesquisas que envolveram as variáveis i) força normal, ii) distância de deslizamento e vii) características (dureza, forma e tamanho) das partículas abrasivas. É importante frisar que tais trabalhos não se referem a “ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa”, de forma que as influências das grandezas iii) diâmetro da esfera de ensaio, iv) rotação da esfera de ensaio, v) concentração da pasta abrasiva, vi) viscosidade do fluido da pasta abrasiva e viii) vazão do composto abrasivo sobre μ não foram revistas, visto que estes parâmetros são comumente adereçados a ensaios “ball-cratering”²⁶.

2.9.3.1. Influência da força normal sobre o coeficiente de atrito

Anteriormente a Nahvi *et al.* [267], Ramos [93] estudou a influência da força normal sobre o comportamento do coeficiente de atrito em ensaios de configuração “roda-de-borracha” (“DSRW – Dry Sand Rubber Wheel”). Em sua Dissertação de Mestrado, foram utilizados corpos-de-prova de aço-carbono AISI 1004 e aço-ferramenta AISI D2, areias ANB 50 e ANB 100 (tamanho médio de partícula de 150 μm e 300 μm , respectivamente; 99,80% SiO_2) e forças normais de 15 N, 30 N, 50 N e 100 N. Este pesquisador registrou que, para todas as combinações de materiais de corpos-de-prova e abrasivos, o coeficiente de atrito foi diretamente proporcional à força normal.

A Figura 2.56 exibe o acréscimo do coeficiente de atrito em função da variação da força normal para o corpo-de-prova de aço-carbono AISI 1004 e areia ANB 50 [93]; é registrado um plausível aumento de μ com a ascensão de N . Ramos [93] atribuiu este comportamento à maior magnitude de encruamento do material do corpo-de-prova com a maximização da força normal, um resultado adverso ao publicado por Stevenson e Hutchings [256], em que o coeficiente de atrito permaneceu independente da força normal (faixa de aplicação: 24,5-122,6 N).

²⁶ No Capítulo 5 foi ministrada a influência da movimentação das partículas abrasivas sobre o coeficiente de atrito.

Figura 2.56. Ascensão do coeficiente de atrito em função do incremento da força normal. Corpo-de-prova de aço-carbono AISI 1004 e areia de SiO_2 – ANB 50 [93]. *Figura editada.*

Na Tabela 2.5 estão todos os resultados obtidos por Ramos [93], referentes ao coeficiente de atrito, em que μ está em função da força normal, material de corpo-de-prova e granulação de areia. Com exceção do corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI D2, em que o coeficiente de atrito diminui para a força normal de 100 N, em todas as condições de ensaio, o coeficiente de atrito aumentou com a ascensão de N .

Tabela 2.5. Variação do coeficiente de atrito em função da força normal e materiais de corpos-de-prova e areias [93]. *Tabela editada.*

Coeficiente de atrito – μ				
$N \downarrow$	Aço-carbono AISI 1004		Aço-ferramenta AISI D2	
	ANB 50	ANB 100	ANB 50	ANB 100
15 N	0,13	0,21	0,19	0,22
30 N	0,21	0,29	0,28	0,31
50 N	0,27	0,34	0,30	0,35
100 N	0,36	0,38	0,26	0,34

Diminuição do coeficiente de atrito.

2.9.3.2. Influência da distância de deslizamento sobre o coeficiente de atrito

A Figura 2.57 mostra a variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para diferentes materiais metálicos [268]. Em todos os casos, há um período em que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da distância de deslizamento e, após,

permanece constante. Goddard e Wilman [268] relacionam o aumento de μ com a incrustação de partículas abrasivas na superfície do corpo-de-prova, provenientes das lixas utilizadas.

Figura 2.57. Comportamento de $\mu = f(S)$ para alumínio, prata e cobre [268]. *Figura editada.*

Bernardes [96] e Santos [97], utilizando corpos-de-prova de ferro fundido nodular e aço, junto a lixas abrasivas de vidro e alumina (grãos 80, 220 e 240), reportaram, em ensaios “pino-sobre-disco”, tendências descendentes do coeficiente de atrito com o aumento da distância de deslizamento.

Bernardes [96] relacionou este fenômeno com a variação da área de contato entre o pino e a lixa abrasiva durante o ensaio, visto que, o pino iniciou o percurso, de trajetória espiral, com 30% de sua área em contato com lixa abrasiva virgem e o terminou com 20% de área contatando material sem uso.

Santos [97] justificou tais resultados correlatando a diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da área de contato entre o pino e a lixa abrasiva, nos instantes finais do experimento e, completou, ressaltando que este comportamento deve-se às próprias características construtivas e de controle do equipamento adotado.

2.9.3.3. Influência das características “dureza”, “forma” e “tamanho” das partículas abrasivas sobre o coeficiente de atrito

Dureza.

Bernardes [96] e Santos [97] reportaram que o coeficiente de atrito é proporcional à relação H_A/H_S ; estes autores mostraram que μ é relativamente maior no regime de desgaste abrasivo “severo” (partículas abrasivas de maior dureza), quando comparado ao coeficiente de

atrito obtido na região de desgaste abrasivo “moderado” (partículas abrasivas de menor dureza).

A Figura 2.58 apresenta a relação entre o coeficiente de atrito e a relação H_A/H_S para corpos-de-prova de ferro fundido nodular e aço e lixas abrasivas de vidro e SiC (grãos 80 e 240) [97].

Figura 2.58. Coeficiente de atrito em função de H_A/H_S . Corpos-de-prova de ferro fundido nodular e aço, junto a lixas de vidro e SiC – grãos 80 e 240 [97]. *Figura editada.*

Entretanto, resultados contrários aos apresentados por Bernardes [96] e Santos [97] foram publicados por Dube e Hutchings [250], afirmando que as durezas dos materiais abrasivos não apresentaram influência sobre o coeficiente de atrito. Infelizmente, as explicações sobre este comportamento deixaram de ser mencionadas por estes pesquisadores [250].

Complementando, não só a dureza, mas também a tenacidade à fratura das partículas abrasivas, podem influir no coeficiente de atrito. Dube e Hutchings [250] mostraram que, condições de abrasão sob “baixa-tensão” (“não-fragmentação” das partículas abrasivas), geraram maiores coeficientes de atrito do que condições de abrasão sob “alta-tensão”, em que ocorre o fracionamento do material abrasivo (Figura 2.59). As condições de “baixa-tensão” e “alta-tensão” foram obtidas com as adoções de discos de borracha e aço, respectivamente. Como corpo-de-prova, foi utilizado aço-carbono AISI 1020, junto a partículas abrasivas de sílica, com tamanho variando entre 125-150 μm .

Figura 2.59. Influência das condições de ensaio de “baixa tensão” e “alta tensão” sobre o coeficiente de atrito [250]. Os termos “angular” e “rounded” referem-se às formas das partículas abrasivas (tomar como referência a Figura 2.28).

Forma.

Para partículas abrasivas esféricas, foram reportados valores de coeficiente de atrito entre 0,1 e 1,2, sendo o mesmo, definido pela soma de duas parcelas, μ_a e μ_p , coeficiente de atrito devido à adesão entre superfícies (partícula abrasiva – corpo-de-prova) e coeficiente de atrito devido ao “ploughing”, respectivamente (Equação 2.32) [146]; μ_a e μ_p são dados, respectivamente, pelas Equações 2.32 e 2.34 [146], em que τ_s é a tensão de cisalhamento do corpo-de-prova e l_r , a largura do risco.

$$\mu = \mu_a + \mu_p \quad (2.32)$$

$$\mu_a = \frac{\tau_s}{\pi H_s} \left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l_r}{D_p} \right)^2} \right] \quad (2.33)$$

$$\mu_p = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 \sin^{-1} \left(\frac{l_r}{D_p} \right) - \sqrt{\left(\frac{D_p}{l_r} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.34)$$

Se as partículas abrasivas forem consideradas cônicas, μ pode ser descrito pela Equação 2.35 [146], em que o ângulo α está esquematizado na Figura 2.60.

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left[\tan(\alpha) + \frac{\tau_s}{H_s} \sec(\alpha) \right] \quad (2.35)$$

Figura 2.60. Ângulo α , para uma partícula abrasiva de formato cônico [146].

Enfatizando esta discussão, os resultados publicados por Dube e Hutchings [250] comprovaram, também, que partículas abrasivas com formato “angular” apresentaram maiores coeficientes de atrito do que partículas abrasivas “arredondadas” (“rounded”), como mostrou a Figura 2.59.

Tamanho.

Na Figura 2.61 [146] há o comportamento do coeficiente de atrito em função do aumento do tamanho das partículas abrasivas, para corpos-de-prova de aço AISI 1095. Estes resultados são oriundos de ensaios do tipo “pino-sobre-disco”, junto às lixas de SiC e forças normais de 4,9 N, 9,8 N, 19,6 N e 39,2 N. Observa-se que, inicialmente, μ aumenta com D_p e, posteriormente, permanece constante.

Figura 2.61. Comportamento de $\mu = f(D_p)$ para corpos-de-prova de aço AISI 1095 e lixas de SiC [146]. *Figura editada.*

Entretanto, os resultados publicados por Sin *et al.* [146] não devem ser tomados como verdade absoluta. Bernardes [96] e Santos [97] mostraram que, se o regime de desgaste abrasivo for “moderado”, o tamanho das partículas abrasivas não apresenta influência sobre o coeficiente de atrito; por outro lado, para o regime de desgaste abrasivo “severo”, μ será proporcional à D_p . Completando, Ramos [93] mostrou, em sua pesquisa, que o coeficiente de atrito aumentou com o aumento da granulometria das areias utilizadas, conforme a Tabela 2.5.

2.9.4. Considerações sobre a determinação do coeficiente de atrito em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa

A metodologia proposta por Kusano e Hutchings [29] e, Rutherford e Hutchings [33], detalhada no Apêndice 1, sugere que o coeficiente de atrito seja determinado em função dos parâmetros geométricos de um equipamento de configuração esfera-livre, o que negligencia os tipos de materiais em contato e, conseqüentemente, a força tangencial (despreza, na verdade, todo o sistema tribológico).

A Figura 2.62 apresenta os resultados obtidos por Kusano e Hutchings [29], referentes ao coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio, em um equipamento de configuração “esfera-livre”.

Figura 2.62. Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Resultados obtidos em um equipamento de configuração “esfera-livre” [29].

O comportamento de $\mu = f(t)$, observado na Figura 2.62, foi obtido de forma teórica, a partir da metodologia [29,33] exposta no Apêndice 1. Embora a clássica equação $\mu = \frac{T}{N}$ não distinga os materiais em contato, esta depende de todo o tribo-sistema, sendo μ , não uma propriedade dos materiais envolvidos, mas sim, uma característica do sistema tribológico.

Na literatura, há pesquisas que tratam de forma minuciosa o comportamento do coeficiente de atrito em desgaste abrasivo (como, por exemplo, as Referências Bibliográficas

[269] e [270]) mas, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa “livre”, apenas a força normal é monitorada durante os ensaios, por meio de uma célula de carga [271].

O fato da força tangencial ser aquisitada ao longo do tempo de teste, de forma direta, pode proporcionar resultados mais realísticos relacionados ao coeficiente de atrito, e é no que se baseiam os princípios desta Tese de Doutorado: o desenvolvimento e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa “fixa” (detalhado nos Apêndices 2 e 3) hábil de aquisitar os valores das forças “normal” e “tangencial” (aplicação de N e medição de T) e, com isso, calcular, de forma prática, a partir da equação $\mu = \frac{T}{N}$, o coeficiente de atrito do conjunto “corpo-de-prova / partículas abrasivas / esfera de ensaio”.

Capítulo 3

Objetivos – Materiais e Métodos

Após a análise do atual quadro científico, a decisão foi por focar-se em duas frentes de pesquisa: (1) *Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo* e (2) *Coeficiente de Atrito*, sendo estes assuntos, abordados sob condições de “força normal constante” e “pressão constante”.

A seguir, é exposta uma síntese sobre a abordagem dada a cada um dos assuntos especificados, assim como a questão de ensaios realizados em “ P constante”.

– *Ensaio conduzidos sob condições de “pressão constante”.*

A Revisão Bibliográfica descrita no Capítulo 2 refere-se a trabalhos realizados somente sob condições de “força normal constante”, não tendo sido abordada, na literatura, a grandeza “pressão” (P), tampouco o comportamento do sistema tribológico “corpo-de-prova / partículas abrasivas / esfera” sob condições de “pressão constante”;

– *Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo.*

Condições tribológicas que favorecem as atuações dos diferentes modos de desgaste abrasivo, demonstram estar compreendidas pelos pesquisadores da área [13,35,50]. A meta é analisar as influências das condições de “força normal constante” e “pressão constante” sobre as atuações dos modos de desgaste abrasivo, pois com o aumento de A_r , sob “ N constante” a “pressão” diminui, o que ocasiona alterações nas condições de ensaio;

– *Coeficiente de Atrito.*

Como citado no Capítulo 2 – Item 2.9.3., muitos trabalhos sobre coeficiente de atrito adquirido durante diversos ensaios de desgaste abrasivo estão disponíveis na literatura, mas somente um pequeno número foi dedicado ao estudo do coeficiente de atrito em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [29,33,270,272]. Em particular, Shipway [270] analisou o coeficiente de atrito em termos do formato e movimento das partículas abrasivas, enquanto que Kusano e Hutchings [29], Rutherford e Hutchings [33] apresentaram um modelo teórico para o cálculo do coeficiente de atrito, em um equipamento de configuração “esfera livre”, baseado nas dimensões mecânicas e geométricas deste. Além disso, Gee e Wicks [53] analisaram o coeficiente de atrito em ensaios “ball-cratering”, mas optaram pela ausência da pasta abrasiva, o que caracterizou “desgaste por deslizamento” e não “desgaste abrasivo”. Neste trabalho, será realizada a medição direta da força tangencial, desenvolvida durante ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa e, com os valores de N e T , será calculado o coeficiente de atrito, sob condições de “ N constante” e “ P constante”.

Este capítulo minudencia todos os materiais utilizados e os procedimentos experimentais estabelecidos para esta pesquisa, sendo dividido em i) *Pesquisas Iniciais* e ii) *Pesquisas Definitivas*.

Os resultados coletados para as “*Pesquisas Iniciais*” foram apresentados em três encontros internacionais: “16th International Conference on Wear of Materials – WOM 2007”, “1st International Conference on Abrasive Processes – ICAP 2008” e “17th International Conference on Wear of Materials – WOM 2009”, realizadas em Montreal – CAN, Universidade de Cambridge – ING e Las Vegas – EUA, respectivamente. Estes trabalhos foram os primeiros a abordar a grandeza física “pressão”, assim como o “coeficiente de atrito”, o que formou a base conceitual para formalizar o planejamento experimental das “*Pesquisas Definitivas*”. Estas, por sua vez, geraram trabalhos apresentados no Exame de Qualificação desta Tese e na “18th International Conference on Wear of Materials – WOM 2011”, organizada na cidade de Philadelphia – EUA.

3.1. *Pesquisas Iniciais*

3.1.1. *Objetivos*

Aqui, as pesquisas foram divididas em dois grupos, sintetizados na Tabela 3.1.

– *Pesquisa 1 – Força Normal Constante.*

São pesquisas que analisaram o comportamento de A_{ris} e A_{rol} (Figura 2.6) em função de S e N [23], sob condições de “ N constante” (“ P variável”);

– *Pesquisa 2 – Força Normal Constante + Pressão Constante.*

São pesquisas que analisaram o comportamento de A_{ris} , A_{rol} e μ em função de S , N e P [12], sob condições de “ N constante” (“ P variável”) e “ P constante” (“ N variável”).

Tabela 3.1. Objetivos das *Pesquisas Iniciais*.

Condição $\Rightarrow$ Assunto $\Downarrow$	Força Normal Constante (pressão variável)	Pressão Constante (força normal constante)
Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo	Estudo do comportamento de A_{ris} e A_{rol} em função de S e N . <i>Pesquisa 1.</i>	Estudo do comportamento de A_{ris} e A_{rol} em função de S e P . <i>Pesquisa 2.</i>
Coeficiente de Atrito	Estudo do comportamento de A_{ris} , A_{rol} e μ em função de S e N . <i>Pesquisa 2.</i>	Estudo do comportamento de A_{ris} , A_{rol} e μ em função de S e P . <i>Pesquisa 2.</i>

Com o objetivo de verificar uma possível fragmentação, após a finalização dos experimentos referentes à *Pesquisa 2*, o tamanho médio das partículas abrasivas foi determinado por Espalhamento de Luz Laser de Baixo Ângulo, para “ N ” e “ P ” constantes.

3.1.2. Pesquisa 1 – Força Normal Constante

3.1.2.1. Materiais

Equipamentos de ensaio.

Foram utilizados dois tipos de equipamentos: um equipamento de configuração i) “esfera-fixa” (Figura 3.1a), descrito em detalhes na Dissertação de Mestrado de Ronaldo Câmara Cozza [22], e um equipamento de configuração ii) “esfera-livre” (Figura 3.1b) [45].

Figura 3.1. Equipamentos de configurações (a) “esfera-fixa” [22] e (b) “esfera livre” [45], utilizados nas Pesquisas Iniciais.

Corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido – e metal duro (WC-Co) classe ISO P20. Todos possuíam forma de triângulo equilátero, com aresta de 16 mm e espessura de 3 mm. Os corpos-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido – foram usinados por eletroerosão a fio, pela empresa Ferosão J. C. R. – Indústria e Comércio Ltda.. As pastilhas de WC-Co P20 não possuíam qualquer tipo de revestimento e foram adquiridas junto à empresa Ordeps – Comércio de Peças e Ferramentas Ltda., revendedora autorizada da Seco Tools S/A (empresa fabricante). A geometria das mesmas recebe a denominação ISO TPGN 160308 (aresta de 16 mm, espessura de 3 mm e raio de ponta de 0,8 mm).

Para a análise da microestrutura do aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido, um dos corpos-de-prova foi embutido em baquelita. Após o embutimento, a superfície do mesmo foi lixada, obedecendo a seguinte sequência de lixas: grão 220, 320, 400 e 600. Em seguida, a superfície foi polida com pastas diamantadas de diferentes granulometrias, na sequência de 6, 3 e 0,25 μm . A última etapa foi o ataque químico com Nital 3%.

Na Figura 3.2 está a composição química nominal do aço-ferramenta AISI M2, assim como sua microestrutura, na condição “temperado e revenido” [22,23].

Figura 3.2. Composição química nominal e microestrutura do aço-ferramenta AISI M2, na condição “temperado e revenido” [22,23].

Assim como no aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido, para a análise da microestrutura do WC-Co P20, um corpo-de-prova foi embutido em baquelita, lixado e polido. O ataque químico de sua superfície foi realizado com MURAKAMI, composto por 10 g de ferrocianeto de potássio ($K_3Fe(CN)_6$), 10 g de hidróxido de potássio (KOH) e 100 ml de água destilada.

A Figura 3.3 apresenta a composição química nominal e a microestrutura do WC-Co P20 [22,23].

Figura 3.3. Composição química nominal e microestrutura do WC-Co P20 [22,23].

Esferas.

Foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro 25,4 mm (1”), adquiridas junto à empresa Só Esferas – Comércio de Esferas Ltda..

A preparação de sua superfície, para a caracterização metalográfica, foi realizada da mesma maneira e com os mesmos materiais utilizados para o aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido. Na Figura 3.4 [12,22,23], apresenta-se a composição química nominal e a microestrutura do aço AISI 52100, na condição “temperado e revenido”. Nesta figura, observa-se a presença de carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz do material.

Figura 3.4. Composição química nominal e microestrutura do aço AISI 52100, na condição “temperado e revenido”. Presença de carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz [12,22,23].

Pasta abrasiva.

A pasta abrasiva foi preparada com carbeto de silício (SiC) preto, comercial de grau técnico, da Alcoa [273], e água destilada. A Figura 3.5a [273] apresenta uma micrografia eletrônica de varredura do pó abrasivo utilizado e, a Figura 3.5b [273], sua distribuição granulométrica, obtida a laser, utilizando o equipamento Granulometer 1064 - CILAS, de fabricação francesa [273].

Figura 3.5. (a) Micrografia eletrônica de varredura do SiC [273]; (b) distribuição granulométrica do SiC [273].

Foi definida uma concentração de pasta abrasiva, conforme mostra a Tabela 3.2 [12,22,23]. As duas colunas da esquerda indicam as porcentagens, em volume, de SiC e água

destilada para a concentração. Na coluna da direita está a massa de SiC por unidade de volume de água destilada ($\text{g}_{\text{SiC}}/\text{cm}^3_{\text{H}_2\text{O}-\text{Dest.}}$); a massa específica do carбето de silício está entre 3,132 e 3,139 g/cm^3 [273].

Tabela 3.2. Concentração da pasta abrasiva [12,22,23].

% SiC (em volume)	% Água destilada (em volume)	$\frac{\text{g}_{\text{SiC}}}{\text{cm}^3_{\text{H}_2\text{O}-\text{Dest.}}}$
25	75	1,045

3.1.2.2. Procedimento experimental

Ensaio conduzidos no equipamento de configuração esfera-fixa.

Na Tabela 3.3 estão as condições estabelecidas para os ensaios conduzidos com o equipamento de configuração esfera-fixa [22,23].

Tabela 3.3. Condições de ensaio definidas para os experimentos realizados com o equipamento de configuração esfera-fixa [22,23].

Condição de ensaio $\Rightarrow$	1	2	3	4	5	6
Força normal - N [N]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Distância de deslizamento - S [m]	8	15	20	25	35	40
Rotação (esfera) - n [rpm]	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Tempo de ensaio - t	160 s (2 min 40 s)	300 s (5 min)	400 s (6 min 40 s)	500 s (8 min 20 s)	700 s (11 min 40 s)	800 s (13 min 20 s)
Gotejamento da pasta abrasiva ²⁸	1 gota / 10 s	1 gota / 10 s	1 gota / 10 s	1 gota / 10 s	1 gota / 10 s	1 gota / 10 s
Quantidade de repetições	4	4	4	4	4	4

Em todas as condições de ensaio, a força normal foi de $N = 1,25$ N. Além disso, como pode ser observado na Tabela 3.3, foram mencionados os valores das distâncias de deslizamento (S) e da rotação da esfera (n). O tempo de ensaio (t) foi consequência dos valores de S , n e R (raio da esfera), conforme é demonstrado a seguir.

O tempo de ensaio pode ser definido pelo quociente da distância de deslizamento pela velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio (v), como mostra a Equação 3.1:

²⁸ Shipway e Howell [34], em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, para 17,2% SiC (em volume), fixaram a vazão da pasta abrasiva em $38 \frac{\mu\text{l}}{\text{s}}$.

$$t = \frac{S}{v} \quad (3.1)$$

Porém, v pode ser escrito pela Equação 3.2:

$$v = 2.\pi.n.R \quad (3.2)$$

Ou, pela Equação 3.3:

$$v = \pi.n.D \quad (3.3)$$

Substituindo a Equação 3.3 na Equação 3.1, chega-se à Equação 3.4, que estabelece o tempo de ensaio em função da distância de deslizamento, rotação e diâmetro da esfera:

$$t = \frac{S}{\pi.n.D} \quad (3.4)$$

S , n e D são grandezas definidas pelo pesquisador.

A rotação da esfera de ensaio foi definida em $n = 37,6$ rpm, mesmo valor adotado por Trezona *et al.* [35] e Adachi e Hutchings [13,50]. Para $n = 37,6$ rpm e $D = 25,4$ mm, a velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio vale $v = 0,05$ m/s que, provavelmente, como publicado por Adachi e Hutchings [13], reduz ou elimina a ocorrência de efeitos hidrodinâmicos durante os ensaios.

Para cada condição de ensaio, quatro repetições foram realizadas. Com base na distância de deslizamento, para os ensaios com os corpos-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido, foram definidos dois grupos e, por sorteio, estabelecidas as seguintes sequências de ensaios:

- *Grupo_1*: 20 – 15 – 20 – 25 – 25 – 20 – 15 – 15 – 15 – 25 – 25 e 20 metros;
- *Grupo_2*: 35 – 40 – 35 – 8 – 40 – 8 – 40 – 8 – 8 – 35 – 35 e 40 metros.

Seguindo este mesmo critério, para os ensaios com as pastilhas de WC-Co P20, a ordem de ensaios ficou definida como:

- *Grupo_1*: 8 – 15 – 8 – 20 – 15 – 20 – 15 – 8 – 8 – 20 – 20 e 15 metros;
- *Grupo_2*: 40 – 25 – 25 – 35 – 40 – 35 – 25 – 40 – 35 – 35 – 40 e 25 metros.

Primeiro, foram realizados os ensaios com o corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido e, posteriormente, com o corpo-de-prova de WC-Co P20. Para ambos, foram realizados os ensaios do *Grupo_1* seguido pelos ensaios do *Grupo_2*.

Todos os ensaios foram realizados sem paradas intermediárias e o gotejamento da pasta abrasiva foi realizado manualmente, por meio de um conta-gotas (1 gota a cada 10 segundos).

Ensaios conduzidos no equipamento de configuração esfera-livre.

Na Tabela 3.4 [23] estão as condições estabelecidas para os ensaios conduzidos com o equipamento de configuração esfera-livre.

Tabela 3.4. Condições de ensaio definidas para os experimentos realizados com o equipamento de configuração esfera-livre [23].

Condição de ensaio ⇒	1	2	3	4	5
Força normal - N [N]	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Distância de deslizamento - S [m]	2,2	8,8	19,8	33	46,2
Rotação da esfera - n [rpm]	82,7	82,7	82,7	82,7	82,7
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Tempo de ensaio - t	20 s	80 s (1 min 20 s)	180 s (3 min)	300 s (5 min)	420 s (7 min)
Gotejamento da pasta abrasiva	1 gota / 5 s	1 gota / 15 s	1 gota / 15 s	1 gota / 15 s	1 gota / 15 s
Quantidade de repetições	3	3	3	3	3

Em todas as condições de ensaio, a força normal foi de $N = 0,39$ N, assim como a rotação da esfera de ensaio, fixada em $n = 82,7$ rpm, resultando em uma velocidade tangencial periférica de $v = 0,11$ m/s, para $D = 25,4$ mm.

Para cada condição de ensaio, três repetições foram realizadas e, com base na distância de deslizamento, para os ensaios com os corpos-de-prova de WC-Co P20, foi estabelecida, por sorteio, a seguinte sequência de ensaios: 2,2 – 33 – 8,8 – 19,8 – 46,2 – 19,8 – 2,2 – 19,8 – 33 – 8,8 – 46,2 – 33 – 2,2 – 8,8 e 46,2 metros.

Em relação ao corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido, foram definidos dois grupos e, por sorteio, estabelecidas as seguintes sequências de ensaios:

- *Grupo_1*: 33 – 19,8 – 46,2 – 19,8 – 19,8 – 33 – 46,2 – 33 e 46,2 metros;
- *Grupo_2*: 8,8 – 2,2 – 8,8 – 2,2 – 2,2 e 8,8 metros.

Primeiro, foram realizados os ensaios com os corpos-de-prova de WC-Co P20 e, após, com os corpos-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido (*Grupo_1* seguido pelo *Grupo_2*).

Todos os ensaios foram realizados sem paradas intermediárias e o gotejamento da pasta abrasiva foi realizado manualmente, por meio de um conta-gotas. Na condição de ensaio “1”, a pasta abrasiva foi inserida a cada 5 segundos, devido ao tempo de ensaio relativamente curto (20 s).

Diferentes valores de força normal e rotação da esfera podem afetar os resultados em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [23]. Porém, devido às características particulares das diferentes configurações dos equipamentos utilizados (“esfera-fixa” e “esfera-livre”), não foi possível adotar condições de ensaio idênticas.

3.1.3. Pesquisa 2 – Força Normal Constante + Pressão Constante

3.1.3.1. Materiais

Equipamento de ensaio.

Nesta parte do trabalho, foi utilizado o equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa descrito nos Apêndices 2 e 3, *em sua configuração anterior*.

Corpo-de-prova.

Uma peça de aço-ferramenta AISI H10 (temperado e revenido), com dimensões de 16 mm x 16 mm x 50 mm, fornecida pelo SENAI “Almirante Tamandaré” – São Bernardo do Campo / SP, foi utilizada como corpo-de-prova.

Para a análise de sua microestrutura, a superfície da mesma foi lixada, obedecendo a seguinte sequência de lixas: grão 220, 320, 400 e 600. Em seguida, a superfície foi polida com pastas diamantadas de diferentes granulometrias, na sequência de 6, 3 e 0,25 µm. A última etapa foi o ataque químico com Nital 3%.

A Figura 3.6 [12] apresenta a composição química nominal e a microestrutura do aço-ferramenta AISI H10, na condição “temperado e revenido”, formada por uma matriz martensítica contendo austenita retida.

Figura 3.6. Composição química nominal e microestrutura do aço-ferramenta AISI H10, na condição “temperado e revenido”. Matriz martensítica contendo austenita retida [12].

Esfera.

Foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro 25,4 mm, como definido no Item 3.1.2.1..

Pasta abrasiva.

A pasta abrasiva foi preparada com carbeto de silício preto e água destilada. A Figura 3.7a [12] mostra uma micrografia eletrônica de varredura do pó abrasivo utilizado, adquirido da empresa Minasolo – Comércio e Representações Ltda.. A distribuição granulométrica deste material é exibida na Figura 3.7b [12], obtida a laser, através do equipamento Granulometer 1064 - CILAS.

Figura 3.7. (a) Micrografia eletrônica de varredura do SiC [12]; (b) distribuição granulométrica do SiC [12].

A concentração da pasta abrasiva ficou definida como na Tabela 3.2 [12,22,23].

3.1.3.2. Procedimento experimental

Os ensaios foram classificados em duas categorias [12]:

- 1) *Ensaio conduzido sob força normal constante – pressão variável;*
- 2) *Ensaio conduzido sob pressão constante – força normal variável.*

Ensaio conduzido sob força normal constante – pressão variável.

A Tabela 3.5 [12] exibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante.

Tabela 3.5. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante [12].

Condição de ensaio $\Rightarrow$	1	2	3	4	5	6
Força normal - N_1 [N]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Força normal - N_2 [N]	5	5	5	5	5	5
Distância de deslizamento - S [m]	10	16	25	40	63	100
Rotação (esfera) - n [rpm]	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Tempo de ensaio - t	200 s (3 min 20 s)	320 s (5 min 20 s)	500 s (8 min 20 s)	800 s (13 min 20 s)	1.260 s (21 min)	2.000 s (33 min 20 s)
Quantidade de repetições	3	3	3	3	3	3

Dois valores de força normal foram selecionados para os ensaios de desgaste: $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N [12]. Os valores da rotação e do diâmetro da esfera de ensaio foram de $n = 37,6$ rpm e $D = 25,4$ mm, respectivamente, o que resulta em $v = 0,05$ m/s [12].

Com base na Série de Renard R20/4 [112], foram fixadas seis distâncias de deslizamento: $S_1 = 10$ m, $S_2 = 16$ m, $S_3 = 25$ m, $S_4 = 40$ m, $S_5 = 63$ m e $S_6 = 100$ m [12]. Os tempos de ensaio correspondentes são, respectivamente, $t_1 = 200$ s (3 min 20 s), $t_2 = 320$ s (5 min 20 s), $t_3 = 500$ s (8 min 20 s), $t_4 = 800$ s (13 min 20 s), $t_5 = 1.260$ s (21 min) e $t_6 = 2.000$ s (33 min 20 s) [12].

Três ensaios foram realizados para cada valor de S e a ordem de ensaios foi a mesma para os diferentes valores de força normal (N_1 e N_2) [12]. Esta sequência foi, por sorteio, definida como: 63 – 10 – 25 – 25 – 100 – 16 – 10 – 63 – 40 – 25 – 63 – 40 – 100 – 10 – 100 – 16 – 40 e 16 metros, o que proporcionou 18 experimentos para cada valor de N [12].

Ensaaios conduzidos sob pressão constante – força normal variável.

A Tabela 3.6 [12] exibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante.

Tabela 3.6. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante [12].

Condição de ensaio $\Rightarrow$	1
Pressão - P_1 [MPa]	1,85
Pressão - P_2 [MPa]	5,13
Distância de deslizamento - S [m]	100
Rotação (esfera) - n [rpm]	37,6
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,05
Tempo de ensaio - t	2.000 s (33 min 20 s)
Quantidade de repetições	3

Com exceção dos valores de P_1 e P_2 , todas as outras grandezas são idênticas às estabelecidas para os ensaios conduzidos sob força normal constante. Entretanto, aqui, os ensaios foram realizados somente para $S = 100$ m [12].

Após a finalização dos ensaios conduzidos sob força normal constante, para cada valor de N , foi construído o gráfico da pressão em função do tempo de ensaio. A pressão foi calculada para cada tempo de ensaio (ou, para cada distância de deslizamento), pela Equação 3.5²⁹, e a área abaixo da curva de $P = f(t)$ foi determinada através da Equação 3.6 [12]:

$$P = \frac{N}{A_t} \quad (3.5)$$

$$A_{FNC} = \int_{t_1}^{t_6} P(t) dt \quad (3.6)$$

A Figura 3.8 [12] apresenta (de forma esquemática) a evolução da pressão em função do tempo e indica a área A_{FNC} (área abaixo da curva de pressão em função do tempo de ensaio, para a condição de força normal constante). Para a condição de pressão constante, uma área equivalente A_{PC} (área abaixo da curva de pressão em função do tempo de ensaio, para a condição de pressão constante), também definida na Figura 3.8, pode ser determinada pela Equação 3.7 [12].

²⁹ Para $h \ll D$, $A_t \cong A_s$ [23,170]; A_s é a área superficial da cratera de desgaste, sendo calculada por $A_s = \pi Dh$ [23,170].

Figura 3.8. Evolução da pressão em função do tempo de ensaio, sob condições de pressão “constante” e “variável”. Definições de A_{FNC} e A_{PC} [12].

$$A_{PC} = P(t_6 - t_1) \quad (3.7)$$

Então, A_{FNC} e A_{PC} são as áreas abaixo das curvas de pressão em função do tempo de ensaio, para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”, respectivamente.

Os ensaios conduzidos sob pressão constante foram estabelecidos de tal forma que $A_{FNC} = A_{PC}$, o que permitiu, através da Equação 3.8, os cálculos dos valores das pressões (constantes) a serem utilizadas [12].

$$P = \frac{\int_{t_1}^{t_6} P(t) dt}{t_6 - t_1} \quad (3.8)$$

Baseado na Equação 3.8, cada valor de força normal constante, $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, proporcionou um valor de pressão constante, $P_1 = 1,85$ MPa e $P_2 = 5,13$ MPa, respectivamente [12].

Durante os ensaios, devido ao aumento de A_t , em tempos pré-determinados, a força normal sofria um reajuste (aumento), com o intuito de manter a pressão constante [12]. Os incrementos de N foram realizados sem paradas intermediárias, através do conjunto “controlador + servo-motor” direcionado ao controle da força normal (detalhado nos Apêndices 2 e 3).

Com base nos tempos de ensaio definidos para os ensaios conduzidos sob força normal constante (Tabela 3.5), foram estabelecidos, em ensaios preliminares, tempos de ajuste intermediários, mencionados na Tabela 3.7, de forma a manter a pressão, aproximadamente, constante.

Tabela 3.7. Tempos de ajuste intermediários definidos para os ensaios realizados sob condições de pressão constante.

Tempos de ajuste intermediários															
t_1	t_1^i	t_1^{ii}	t_1^{iii}	t_2	t_2^i	t_2^{ii}	t_2^{iii}	t_3	t_3^i	t_3^{ii}	t_4	t_4^i	t_5	t_5^i	t_6
200 s (3 min 20 s)	230 s (3 min 50 s)	260 s (4 min 20 s)	290 s (4 min 50 s)	320 s (5 min 20 s)	365 s (6 min 5 s)3	410 s (6 min 50 s)	455 s (7 min 35 s)	500 s (8 min 20 s)	600 s (10 min)	700 s (11 min 40 s)	800 s (13 min 20 s)	1.030 s (17 min 10 s)	1.260 s (21 min)	1.630 s (27 min 10 s)	2.000 s (33 min 20 s)

	Tempos de ensaio adotados para os ensaios realizados sob “ N constante” (Tabela 3.5);
	Tempos de ajuste intermediários, para os ensaios realizados sob “ P constante”.

3.1.3.3. Aquisição de dados e análises de resultados

Os valores da força normal (N) e da força tangencial (T) foram registrados durante todos os ensaios, a cada $t = 20$ s, e o coeficiente de atrito (μ) foi calculado através da Equação 2.31 [12] ($\mu = T/N$).

Análise de Variância – ANOVA.

Todos os resultados foram analisados por ANOVA (Análise de Variância) [274-276], sob um nível de significância (Ω) de 10%, como explicado a seguir.

Força Normal Constante – grupos independentes. Para cada valor de força normal, as curvas de $\mu = f(t)$ foram comparadas [12]:

- 1) Para $N_1 = 1,25$ N, os valores dos coeficientes de atrito obtidos para $S_1 = 10$ m, $S_2 = 16$ m, $S_3 = 25$ m, $S_4 = 40$ m, $S_5 = 63$ m e $S_6 = 100$ m, foram comparados;
- 2) Para $N_2 = 5$ N, os valores dos coeficientes de atrito obtidos para $S_1 = 10$ m, $S_2 = 16$ m, $S_3 = 25$ m, $S_4 = 40$ m, $S_5 = 63$ m e $S_6 = 100$ m, foram comparados.

Pressão Constante – grupos independentes. Para cada valor de pressão, as curvas de $\mu = f(t)$ foram comparadas [12]:

- 1) Para $P_1 = 1,85$ MPa, os valores dos coeficientes de atrito obtidos para $S = 100$ m, foram comparados;
- 2) Para $P_2 = 5,13$ MPa, os valores dos coeficientes de atrito obtidos para $S = 100$ m, foram comparados.

Dados Discrepantes.

Adicionalmente, foram conduzidas, para os valores de μ , análises de “Dados Discrepantes” [276], seguindo-se a recomendação de que, aproximadamente, 67% dos resíduos padronizados estejam compreendidos no intervalo $[-1; 1]$ e, 95%, entre $[-2; 2]$; valores fora de $[-3; 3]$ devem ser analisados.

Para um melhor entendimento sobre o conceito de “Dados discrepantes”, recomenda-se a leitura do livro “Análise de Variância – ANOVA”, de S. Vieira [276].

3.2. Pesquisas Definitivas

Em 1999, Trezona *et al.* [35] publicaram mapeamentos sobre as atuações dos modos de desgaste abrasivo, para diferentes materiais de corpo-de-prova e partículas abrasivas, em função da força normal e da concentração da pasta abrasiva e, seguindo esta linha de pesquisa, em 2003, Adachi e Hutchings [13] propuseram um modelamento para a previsão do modo de desgaste abrasivo atuante em um sistema tribológico. Entretanto, embora N e v sejam os principais parâmetros relacionados às ações dos modos de desgaste abrasivo, como discutido no Capítulo 2 – Item 2.6.1., nenhum desses trabalhos considerou a influência da “*distância de deslizamento – S*” sobre a ocorrência de “desgaste abrasivo por riscamento” ou “desgaste abrasivo por rolamento”, influência esta, embasada nos resultados referentes à *Pesquisa 1 – Força Normal Constante (Pesquisas Iniciais)*. Logo, para os gráficos das Figuras 2.36 e 2.38, uma condição que, a princípio está na região de “desgaste abrasivo por riscamento” pode, em função da distância de deslizamento, transitar para a área de “desgaste abrasivo por rolamento”, e vice-versa, como será discutido no Capítulo 4. Além disso, referenciando os resultados de Adachi e Hutchings [13], não se sabe se os mesmos estavam em Regime Permanente de Desgaste.

Em relação ao coeficiente de atrito, há poucos trabalhos [29,33] focados no estudo desta grandeza em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, apresentados na

Revisão Bibliográfica (Capítulo 2). Com isso, aparentemente, a primeira publicação a efetivamente medir o coeficiente de atrito em ensaios “ball-cratering” está detalhada nesta Tese [12]; até então, μ vinha sendo determinado somente de forma teórica [29,33].

Os objetivos das *Pesquisas Definitivas* foram discutidos e definidos de forma a contemplar estas deficiências científicas, como descrito a seguir.

3.2.1. Objetivos

Novamente, esta parte do trabalho foi dividida em dois segmentos, organizados na Tabela 3.8.

– Pesquisa 1 – Força Normal Constante

São pesquisas que estudaram o comportamento de A_{ris} e μ , em função de S , N e v , sob condições de “ N constante”.

– Pesquisa 2 – Pressão Constante

São pesquisas que estudaram o comportamento de A_{ris} e μ , em função de S , N e v , sob condições de “ P constante”.

Tabela 3.8. Objetivos das *Pesquisas Definitivas*.

Condição $\Rightarrow$ Assunto $\Downarrow$	Força Normal Constante (pressão variável)	Pressão Constante (força normal constante)
Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo	Estudo do comportamento de A_{ris} em função de S , N e v . <i>Pesquisa 1.</i>	Estudo do comportamento de A_{ris} em função de S , N e v . <i>Pesquisa 1.</i>
Coefficiente de Atrito	Estudo do comportamento de μ em função de S , N e v . <i>Pesquisa 2.</i>	Estudo do comportamento de μ em função de S , N e v . <i>Pesquisa 2.</i>

Em termos de atuações dos modos de desgaste abrasivo, S , N e v são as principais variáveis em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa que, por consequência, podem influir no comportamento de μ . Portanto, a consideração simultânea destes três parâmetros pode fornecer resultados detalhados sobre A_{ris} e μ , além do que, neste trabalho, a meta é que as análises sejam conduzidas sob Regime Permanente de Desgaste, constatação a ser deferida pelo levantamento dos gráficos de $V = f(S)$.

3.2.2. Materiais

Equipamento de ensaio.

Nesta etapa, foi utilizado o equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa “fixa” descrito nos Apêndices 2 e 3, cuja configuração mecânica diferencia-se dos tribômetros dispostos comercialmente pelas empresas “CSM Instruments Inc” [277] e “Phoenix Tribology Ltd” [278], além do próprio Trabalho de Formatura de Bergantin [279].

Corpo-de-prova.

Foi utilizado o corpo-de-prova aço-ferramenta AISI H10 (temperado e revenido), mencionado no Item 3.1.3.1..

Esfera.

Foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro 25,4 mm.

Pasta abrasiva.

A pasta abrasiva foi preparada com carbeto de silício preto (detalhado no Item 3.1.3.1.) e água destilada, sob diferentes concentrações, cujos valores estão mencionados no Item 3.2.3..

3.2.3. Procedimento Experimental

Os ensaios foram classificados em duas categorias:

- 1) *Ensaaios conduzidos sob força normal constante – pressão variável;*
- 2) *Ensaaios conduzidos sob pressão constante – força normal variável.*

3.2.3.1. Ensaaios conduzidos sob força normal constante – pressão variável

A Tabela 3.9 exhibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante.

Dois valores de força normal foram selecionados para os ensaios de desgaste, $N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $N_2 = 1,25 \text{ N}$, assim como as frações volumétricas de SiC: $\vartheta_1 = 5\%$, $\vartheta_2 = 25\%$ e $\vartheta_3 = 37,5\%$. Com os valores de N e ϑ , foram estabelecidas 6 combinações: “ $N_1 + \vartheta_1$ ”, “ $N_1 + \vartheta_2$ ”, “ $N_1 + \vartheta_3$ ”, “ $N_2 + \vartheta_1$ ”, “ $N_2 + \vartheta_2$ ” e “ $N_2 + \vartheta_3$ ”. Para cada combinação “ $N + \vartheta$ ”, três

ensaios foram realizados para cada valor de S , seguindo a seguinte sequência de ensaios estabelecida por sorteio: 32 – 10 – 32 – 10 – 10 – 32 – 100 – 100 e 100 metros. No total, conduziram-se 54 ensaios sob condições de *força normal constante*.

Em todos os experimentos, a rotação da esfera de ensaio foi de $n = 37,6$ rpm, ocasionando $v = 0,05$ m/s.

Tabela 3.9. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob força normal constante.

Condição de ensaio $\Rightarrow$	1	2	3
Força Normal - N_1 [N]	0,5	0,5	0,5
Força Normal - N_2 [N]	1,25	1,25	1,25
Fração volumétrica de SiC - ϑ_1 [%]	5 (com 95% água destilada)	5 (com 95% água destilada)	5 (com 95% água destilada)
Fração volumétrica de SiC - ϑ_2 [%]	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)
Fração volumétrica de SiC - ϑ_3 [%]	37,5 (com 62,5% água destilada)	37,5 (com 62,5% água destilada)	37,5 (com 62,5% água destilada)
Distância de deslizamento - S [m]	10	32	100
Rotação (esfera) - n [rpm]	37,6	37,6	37,6
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,05	0,05	0,05
Tempo de ensaio - t	200 s (3 min 20 s)	1.260 s (21 min)	2.000 s (33 min 20 s)
Quantidade de repetições	3	3	3

3.2.3.2. Ensaios conduzidos sob pressão constante

A Tabela 3.10 exhibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante.

Dois valores de pressão foram definidos, $P_1 = 0,88$ MPa e $P_2 = 1,54$ MPa, calculados seguindo o critério descrito no Item 3.1.3.2., pela Figura 3.8 e Equações 3.5-3.8.

Os valores de ϑ foram, assim como nos ensaios sob “ N constante”, $\vartheta_1 = 5\%$, $\vartheta_2 = 25\%$ e $\vartheta_3 = 37,5\%$ e, junto com P_1 e P_2 , definiram-se as combinações “ $P_1 + \vartheta_1$ ”, “ $P_1 + \vartheta_2$ ”, “ $P_1 + \vartheta_3$ ”, “ $P_2 + \vartheta_1$ ”, “ $P_2 + \vartheta_2$ ” e “ $P_2 + \vartheta_3$ ”. Novamente, para cada combinação “ $P + \vartheta$ ”, três ensaios foram realizados para cada valor de S , seguindo os mesmos valores e ordem de ensaios definidos no Item 3.2.3.1.: 32 – 10 – 32 – 10 – 10 – 32 – 100 – 100 e 100 metros, totalizando 54 ensaios conduzidos sob *pressão constante*.

Completando, a rotação da esfera ficou fixada em $n = 37,6$ rpm, valor idêntico ao adotado anteriormente.

Tabela 3.10. Condições de ensaio definidas para os experimentos conduzidos sob pressão constante.

Condição de ensaio $\Rightarrow$	1	2	3
Pressão - P_1 [MPa]	0,88	0,88	0,88
Pressão - P_2 [MPa]	1,54	1,54	1,54
Fração volumétrica de SiC - ϑ_1 [%]	5 (com 95% água destilada)	5 (com 95% água destilada)	5 (com 95% água destilada)
Fração volumétrica de SiC - ϑ_2 [%]	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)
Fração volumétrica de SiC - ϑ_3 [%]	37,5 (com 62,5% água destilada)	37,5 (com 62,5% água destilada)	37,5 (com 62,5% água destilada)
Distância de deslizamento - S [m]	10	32	100
Rotação (esfera) - n [rpm]	37,6	37,6	37,6
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	0,05	0,05	0,05
Tempo de ensaio - t	200 s (3 min 20 s)	1.260 s (21 min)	2.000 s (33 min 20 s)
Quantidade de repetições	3	3	3

Assim como nas *Pesquisas Iniciais*, durante os ensaios, devido ao aumento de A_f , em tempos pré-determinados, a força normal sofreu um reajuste (aumento), com o intuito de manter a pressão constante. Os incrementos de N foram realizados sem paradas intermediárias, por meio do conjunto “controlador + servo-motor” direcionado ao controle da força normal (detalhado no Apêndice 2).

Com base nos tempos de ensaio definidos para os ensaios conduzidos sob força normal constante (Tabela 3.9), foram estabelecidos, em ensaios preliminares, tempos de ajuste intermediários, mencionados na Tabela 3.11, de forma a manter a pressão, aproximadamente, constante.

Tabela 3.11. Tempos de ajuste intermediários definidos para os ensaios realizados sob condições de pressão constante.

Tempos de ajuste intermediários															
t_1^i	t_1^{ii}	t_1^{iii}	t_1	t_2^i	t_2^{ii}	t_2^{iii}	t_2	t_3^i	t_3^{ii}	t_3^{iii}	t_3^{iv}	t_3^v	t_3^{vi}	t_3^{vii}	t_3
50 s	100 s (1 min 40 s)	150 s (2 min 30 s)	200 s (3 min 20 s)	310 s (5 min 10 s)3	420 s (7 min)	530 s (8 min 50 s)	640 s (10 min 40 s)	810 s (13 min 30 s)	980 s (16 min 20 s)	1.150 s (19 min 10 s)	1.320 s (22 min)	1.490 s (24 min 50 s)	1.660 s (27 min 40 s)	1.830 s (30 min 30 s)	2.000 s (33 min 20 s)

- Tempos de ensaio adotados para os ensaios realizados sob “ N constante” (Tabela 3.9);
- Tempos de ajuste intermediários, para os ensaios realizados sob “ P constante”.

3.2.3.3. Aquisição e análise de dados

Os valores da força normal (N) e da força tangencial (T), foram monitorados e registrados, durante todos os ensaios, por intermédio de um sistema de aquisição de dados, sob uma frequência de 100 Hz, e o coeficiente de atrito (μ) calculado pela Equação 2.31.

Assim como nas *Pesquisas Iniciais* (Item 3.1.), foram conduzidas análises de Análise de Variância [274-276] nos gráficos de $\mu = f(t)$, sob um nível de significância (Ω) de 10%, como explicado a seguir.

Força Normal Constante

Força Normal Constante – grupos independentes. Para cada valor de força normal, as curvas de $\mu = f(t, C)$ foram comparadas:

- 1) Para $N_1 = 0,50$ N, os valores dos coeficientes de atrito obtidos sob $S_1 = 10$ m, $S_2 = 32$ m e $S_3 = 100$ m combinados com C_1 , C_2 e C_3 , foram comparados (27 curvas);
- 2) Para $N_2 = 1,25$ N, os valores dos coeficientes de atrito obtidos sob $S_1 = 10$ m, $S_2 = 32$ m e $S_3 = 100$ m combinados com C_1 , C_2 e C_3 , foram comparados (27 curvas).

Força Normal Constante – comparação entre grupos. As curvas de $\mu = f(t, C)$ obtidas para $N_1 = 0,50$ N e $N_2 = 1,25$ N foram comparadas entre si (54 curvas).

Pressão Constante

Pressão Constante – grupos independentes. Para cada valor de pressão, as curvas de $\mu = f(t, C)$ foram comparadas:

- 1) Para $P_1 = 0,88$ MPa, os valores dos coeficientes de atrito obtidos sob $S_1 = 10$ m, $S_2 = 32$ m e $S_3 = 100$ m combinados com C_1 , C_2 e C_3 , foram comparados (27 curvas);
- 2) Para $P_2 = 1,54$ MPa, os valores dos coeficientes de atrito obtidos sob $S_1 = 10$ m, $S_2 = 32$ m e $S_3 = 100$ m combinados com C_1 , C_2 e C_3 , foram comparados (27 curvas).

Pressão Constante – comparação entre grupos. As curvas de $\mu = f(t)$ obtidas para $P_1 = 0,88$ MPa e $P_2 = 1,54$ MPa foram comparadas entre si (54 curvas).

Análise Comparativa Global de Resultados

Força Normal Constante + Pressão Constante – análise comparativa global. Todos os gráficos de $\mu = f(t)$ obtidos sob as condições estabelecidas de “força normal constante” e “pressão constante” foram comparados entre si (108 curvas).

3.3. Durezas dos materiais

Para o cálculo da dureza do SiC, mencionado no Item 3.1.2.1. (fornecido pelo Prof. J.C. Bressiani – IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares [273]), uma porção do material foi sinterizada via fase líquida e dez indentações Vickers foram conduzidas sob uma carga de 50 N e tempo de 15 s [273]. Com os mesmos valores de força e tempo (50 N e 15 s, respectivamente) adotados por Izhevskiy *et al.* [273], foram medidas as durezas Vickers dos corpos-de-prova (aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido e WC-Co P20) e das esferas de ensaio de aço AISI 52100 – temperado e revenido. De forma aleatória, foram realizadas treze indentações na superfície de cada material. Após os ensaios, descartou-se o valor de dureza obtido na primeira indentação. Em seguida, a dureza do material foi determinada pela média aritmética dos dez valores mais próximos entre si [12,22,23].

Para a medição da dureza Vickers do aço-ferramenta AISI H10 – temperado e revenido, foram realizadas três indentações sob 50 N e 15 s, também. Com os três valores de dureza obtidos, a dureza do material foi definida como a média aritmética destes [12,22,23].

A Tabela 3.12 reúne os valores das durezas dos materiais utilizados (corpos-de-prova, esferas de ensaio e carbeto de silício). Originalmente, as unidades de todos os valores estavam em HV e, posteriormente, foram convertidos para GPa [12,22,23].

Destaca-se que, o valor de dureza referenciado para o SiC, seguindo a Referência [273], está abaixo da quantificação publicada por Hutchings [75].

Tabela 3.12. Durezas dos materiais [12,22,23].

Material		Dureza - GPa (HV)
Corpo-de-prova	Aço-ferramenta AISI M2 – temperado e revenido	6,4 (652)
	WC-Co P20	11,7 (1193)
	Aço-ferramenta AISI H10 – temperado e revenido	7,1 (720)
Esfera	Aço-ferramenta AISI 52100 – temperado e revenido	8,4 (856)
Partículas abrasivas	SiC	18,5 - 19 (1886 - 1937)

Capítulo 4

Resultados e Discussão – Pesquisas Iniciais

A fragmentação das partículas abrasivas foi analisada somente após a finalização dos ensaios referentes à *Pesquisa 2 – Força Normal Constante + Pressão Constante*. Entretanto, a discussão dos resultados se iniciará por este assunto, pois, determinados pontos da própria discussão, dependerão das considerações aqui estabelecidas.

4.1. Fragmentação das partículas abrasivas

Resultados e Discussão provenientes da Pesquisa 2 – “N constante” + “P constante”

Recordando a explicação dada na Sub-Seção 2.2.3., a diferença entre desgaste abrasivo sob “alta-tensão” e desgaste abrasivo sob “baixa-tensão” está, respectivamente, na “fragmentação” e “não-fragmentação” das partículas abrasivas durante o processo de desgaste [72,107].

Em ensaios do tipo “roda-de-borracha” (“DSRW – Dry Sand Rubber Wheel”), Dube e Hutchings [250], Grigoroudis e Stephenson [280] e Wirojanupatump e Shipway [281] estudaram a fragmentação de partículas abrasivas com tamanho médio variando entre 100-600 μm , sendo observado tal comportamento. Stachowiak e Stachowiak [49] analisaram o fracionamento de partículas abrasivas em “ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa” e concluíram que, durante os ensaios, ocorre a fragmentação das mesmas. Entretanto, esta afirmação não deve ser generalizada, pois estes autores reportaram a quebra de partículas abrasivas de vidro (“glass beads”), sílica, quartzo e alumina, com tamanho médio entre 250-300 μm , uma faixa superior à mencionada no Item 2.2.1., *para ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa*.

Nas análises conduzidas nesta Tese, não foi observada a fragmentação do material abrasivo utilizado (carbeto de silício preto, com tamanho médio de 3 μm). Após as observações de distribuição granulométrica, para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”, foram registrados tamanhos médios de partículas abrasivas de 2,61 μm e 3,46 μm , respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta uma imagem do carbeto de silício antes dos ensaios, conforme recebido pela Empresa Minasolo – Comércio e Representações Ltda..

Figura 4.1. Carбето de silício sem uso, conforme recebido pela Empresa Minasolo – Comércio e Representações Ltda..

Na Figura 4.2 estão imagens do carбето de silício após os experimentos, conduzidos sob “força normal constante” (Figura 4.2a) e “pressão constante” (Figura 4.2b). Em concordância qualitativa com os resultados provenientes das análises de distribuição granulométrica, pela Figura 4.2, visualmente, também não se observa a fragmentação das partículas abrasivas.

Figura 4.2. Carбето de silício após a realização dos ensaios conduzidos sob (a) “força normal constante” e (b) “pressão constante”.

Este é um resultado adverso ao publicado por Stachowiak e Stachowiak [49] que, por imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, foi possível captar partículas abrasivas fragmentadas junto às partículas ilesas, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Na Figura 4.3 apresenta-se uma imagem (aquisitada após os ensaios) das partículas abrasivas de sílica, adotadas por Stachowiak e Stachowiak [49], em que estão inclusas partículas “fragmentadas” (menores) e “não-fragmentadas” (maiores).

Figura 4.3. Partículas abrasivas de sílica com ocorrência de “fragmentação” [49].

Por outro lado, em concordância qualitativa com os resultados observados neste trabalho, Bozzi e de Mello [282] não reportaram fragmentações significativas de partículas abrasivas de SiC em ensaios sob condições predominantemente por rolamento; o material abrasivo possuía $D_p = 248^{+42}$ μm antes dos ensaios e, após, $D_p = 236^{+44}$ μm.

As explicações para os resultados adversos publicados por Stachowiak e Stachowiak [49], Bozzi e de Mello [282] podem estar relacionados aos valores de K_{Ic} – tenacidade à fratura em tensão plana – do SiC e da SiO₂ (sílica):

$$\text{SiC: } K_{Ic} \cong 4,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$\text{SiO}_2: K_{Ic} < 1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Maiores valores de K_{Ic} exigem maiores tensões críticas (σ_c) para iniciar as nucleações e propagações de trincas e, consequentemente, fragmentar o material abrasivo. O carbeto de silício, com $K_{Ic} \cong 4,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, praticamente permanece insensível, ou apresenta fracionamento desprezível, tanto às condições de ensaio definidas por Bozzi e de Mello [282], quanto às solicitações impostas em *ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa*.

4.2. Atuações dos Modos de Desgaste Abrasivo

Resultados e Discussão provenientes da Pesquisa 1 – Força Normal Constante

4.2.1. Efeito da severidade de ensaio sobre a transição entre os modos de desgaste abrasivo

Cozza *et al.* [23] nomearam o produto Pv [283] como “severidade de ensaio”, sendo simbolizado por S_{ens} (Equação 4.1), em que P é a pressão desenvolvida no sistema tribológico “esfera – partículas abrasivas – corpo-de-prova” e calculada pela Equação 3.5. Esta definição é diferente do conceito anteriormente introduzido por Adachi e Hutchings [13,50].

$$S_{ens} = Pv \quad (4.1)$$

Nas Tabelas 1-4 (Apêndice 4) estão os valores pelos quais S_{ens} foram calculados para os corpos-de-prova de WC-Co P20 e aço-ferramenta AISI M2, junto às configurações de equipamentos “esfera-livre” e “esfera-fixa”. A Figura 4.4a [23] apresenta a evolução da severidade de ensaio em função do tempo, para os experimentos conduzidos sobre os corpos-de-prova de WC-Co P20 e, a Figura 4.4b [23], sobre os corpos-de-prova de aço-ferramenta AISI M2, para ambas configurações de equipamentos (“esfera-livre” e “esfera-fixa”).

Em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, conduzidos sob força normal constante, independente da configuração do equipamento, a pressão diminui com o andamento do ensaio, uma vez que N permanece constante e A_t aumenta, como esquematiza a Equação 4.2. Em consequência, devido a diminuição da pressão, ocorre o decréscimo da severidade de ensaio.

$$P = \frac{N}{A_t} \quad (4.2)$$

A severidade de ensaio calculada para o aço-ferramenta AISI M2, sendo sua dureza, H_{S-M2} , menor que a dureza da esfera, foi maior no equipamento de configuração “esfera-fixa” do que no equipamento de configuração “esfera-livre” (Figura 4.4b [23]). Com o material WC-Co P20, onde $H_{S-P20} > H_E$, sendo H_{S-P20} a dureza do metal duro WC-Co P20, os valores de S_{ens} foram, praticamente, equivalentes para ambas configurações de equipamentos (Figura 4.4a [23]).

A Figura 4.5a [23] apresenta a relação A_g/A_t em função do tempo de ensaio e, as Tabelas 5-8 (Apêndice 4), seus respectivos valores. As Figuras 4.5b [23] e 4.5c [23] exibem duas crateras de desgaste, para a condição $A_g/A_t = 0$, em que há somente a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento e $0 < A_g/A_t < 1$, em que há atuação simultânea de desgaste abrasivo por riscamento e desgaste abrasivo por rolamento. $A_g/A_t = 1$ refere-se à condição em que age somente desgaste abrasivo por riscamento, mas esta situação não foi obtida nos experimentos [23]. Pela Figura 4.5a, observa-se que, ensaios com tempos relativamente baixos resultaram em crateras de desgaste, apresentando atuação de modo-misto de desgaste

abrasivo e uma tendência geral englobou todos os experimentos: a evolução do tempo de ensaio esteve associada à diminuição da área projetada com atuação de desgaste abrasivo por riscamento (A_g), *i.e.*, a diminuição do quociente A_g/A_t , até o ponto em que foi reportada somente a ação de desgaste abrasivo por rolamento [23].

Figura 4.4. Comportamento da severidade de ensaio em função do tempo de ensaio. Corpos-de-prova de (a) WC-Co P20 e (b) aço-ferramenta AISI M2. Ensaios conduzidos em equipamentos de configuração “esfera-livre” e “esfera-fixa” [23].

$\frac{A_g}{A_t} = 0$
Desgaste abrasivo por
rolamento

$0 < \frac{A_g}{A_t} < 1$
Desgaste abrasivo misto

Figura 4.5. (a) Quociente A_g/A_t em função do tempo de ensaio para ambas configurações de equipamentos e materiais de corpos-de-prova; (b) desgaste abrasivo por rolamento para a condição $A_g/A_t = 0$ e (c) desgaste abrasivo misto (riscamento + rolamento) para a condição $0 < A_g/A_t < 1$.

Imagens (b) e (c): corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 para $S = 46,2$ m e $S = 4$ m, respectivamente [23].

Os resultados da Figura 4.5a [23] podem ser explicados, admitindo-se que, no começo do ensaio, a pressão é relativamente alta e, sob esta circunstância, as partículas abrasivas encontram maior dificuldade em rolar do que em situações de relativa baixa pressão. Logo, a área projetada com atuação de desgaste abrasivo por riscamento (A_g) é maior no começo, do que no fim do ensaio. Fortalecendo este ponto, de posse da conclusão de que não houve a fragmentação das partículas abrasivas durante os ensaios, é sensato admitir que a força normal e a pressão atuantes sobre cada partícula diminuem com o aumento da distância de deslizamento, visto que, gradativamente, há uma quantidade maior de material abrasivo participando do processo de desgaste. As diminuições destas grandezas físicas permitem que as partículas abrasivas tenham maior mobilidade, *i.e.*, maior facilidade para rolar, diminuindo, assim, a atuação de desgaste abrasivo por riscamento [23]. Esta linha de discussão pode, também, ser conduzida com base no Item 2.7., “Embasamento conceitual sobre a movimentação das partículas abrasivas”, que enfatizou as teorias propostas por J.A. Williams e A.M. Hyncica [168,169], e K. Adachi e I.M. Hutchings [13].

A Figura 4.5a também indica que, no caso do corpo-de-prova de WC-Co P20, em que ambas configurações de equipamentos forneceram valores semelhantes de S_{ens} , a transição do modo de desgaste abrasivo “riscamento” para “rolamento” ocorreu, aproximadamente, no mesmo tempo de ensaio (500 s). Entretanto, para o caso de severidades de ensaio significativamente diferentes, observado para os ensaios conduzidos nos corpos-de-prova de aço-ferramenta AISI M2, a transição entre os modos de desgaste abrasivo ocorreu primeiro para a condição de menor severidade de ensaio. Estes resultados estão em concordância qualitativa com a hipótese que associa “menores pressões” (menores severidades de ensaio) com “elevadas tendências” de atuar somente desgaste abrasivo por rolamento [23].

4.2.2. Relação entre volume de desgaste e pressão

Um resultado interessante foi obtido quando os valores do volume de desgaste foram organizados em função da pressão (Tabelas 9-12 – Apêndice 4 – e Figura 4.6 [23]). Os resultados descrevem duas curvas características, uma referente aos ensaios realizados no equipamento de configuração “esfera-livre” e outra, relacionada aos experimentos conduzidos no equipamento de configuração “esfera-fixa” [23].

É importante ressaltar a atenção na análise dos comportamentos de $V = f(P)$, uma vez que o volume de desgaste diminui com o aumento da pressão e, conseqüentemente, com a

severidade de ensaio. O tempo de ensaio não está sendo diretamente considerado nos eixos e, em conjunto com diferentes valores de S_{ens} , pontos de baixa pressão estão relacionados a elevados tempos de ensaio, em que o volume de desgaste é relativamente maior [23].

Figura 4.6. Comportamento do volume de desgaste, em função da evolução da pressão, para ambas configurações de equipamentos e materiais de corpos-de-prova.

Para facilitar a interpretação, as curvas traçadas na Figura 4.6 [23] podem ser analisadas da “direita para a esquerda”. De imediato, pode-se constatar que os resultados estão em perfeita concordância qualitativa com a evolução natural de um processo de desgaste micro-abrasivo. Maiores pressões (à direita das curvas) estão relacionadas a tempos de ensaio relativamente baixos o que, conseqüentemente, produzem volumes de desgaste equivalentes. Seguindo as curvas, caminha-se para uma diminuição de P e aumento de V : com o andamento do ensaio, ocorre a diminuição da pressão, devido ao aumento de A_r , e a conseqüente ascensão do volume de desgaste. Naturalmente, esta análise foi realizada para a condição de força normal constante, como esquematizou a Equação 4.2.

Para cada configuração de equipamento, observa-se que, as curvas obtidas para cada material de corpo-de-prova, estão sobrepostas. A explicação para este comportamento pode estar relacionada às geometrias das crateras de desgaste: “a taxa de desgaste é baseada na profundidade da cratera de desgaste $\Rightarrow$ a profundidade está relacionada ao diâmetro $\Rightarrow$ o diâmetro afeta a pressão desenvolvida”. Seguindo esta linha de raciocínio, a comparação do comportamento ao desgaste dos materiais baseia-se no fator “tempo”, que não é, diretamente,

contabilizado no gráfico de $V = f(P)$ e, portanto, uma curva coincide com a outra para diferentes materiais de corpos-de-prova e mesma configuração de equipamento; a diferença entre curvas pode estar relacionada, entre outros parâmetros de ensaio, à velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio.

4.3. Coeficiente de Atrito

4.3.1. Condições de Força Normal Constante

Análises conduzidas por Microscopia Óptica (MO) das crateras de desgaste obtidas neste trabalho indicaram que, em todas as calotas esféricas, o modo de desgaste abrasivo, unânime, foi “riscamento”, uma condição que pode ser definida como $A_g/A_t = 1$ [23]. Entretanto, quando observações mais detalhadas foram realizadas com o auxílio de imagens aquisitadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi observada a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento ao longo do desgaste abrasivo por riscamento gerado, *i.e.*, a Microscopia Eletrônica de Varredura revelou a atuação de desgaste abrasivo por rolamento ao longo dos riscos. Neste caso, embora a maior ampliação oferecida pelas fotografias obtidas por MEV seja um fator predominante, outros aspectos em ambas as técnicas de aquisição de imagens podem ser responsáveis pelas diferenças nas observações. Em particular, deve-se, obrigatoriamente, considerar que imagens obtidas por Microscopia Óptica são extremamente dependentes de contrastes, envolvendo “luz” e “sombra”, devido ao sistema de iluminação [12].

A Figura 4.7a [12] apresenta uma imagem adquirida por Microscopia Óptica de uma cratera de desgaste, em que somente desgaste abrasivo por riscamento é visível (“macro-escala”). As Figuras 4.7b, 4.7c e 4.7d são fotografias da mesma cratera de desgaste, em diferentes escalas de ampliação, em que é possível notar a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento ao longo dos riscos [12]. Neste caso (“micro-escala”), a relação A_g/A_t , definida por Cozza *et al.* [23], não é válida e futuras pesquisas são necessárias para definir um parâmetro que forneça uma indicação quantitativa da fração de desgaste abrasivo por rolamento, com referência ao desgaste abrasivo por riscamento (Ξ). Nesta Tese de Doutorado, este fenômeno (a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento, na superfície ou entre os riscos) foi denominado de “micro-rolling abrasion” [12], (“micro-rolamento”, na Língua Portuguesa).

Figura 4.7. Cratera de desgaste obtida nos ensaios. (a) “Macro-visão” e (b)-(c)-(d) “micro-visão”, força normal constante de 1,25 N e distância de deslizamento de 25 m. Ocorrência de “micro-rolling abrasion” [12].

É importante salientar que a excentricidade da esfera de ensaio (compreendida entre 21-27 μm)³⁰ foi considerada, durante as análises dos resultados, como uma possível causa para a ocorrência de “micro-rolling abrasion” [12]. Entretanto, durante todos os ensaios, nenhuma oscilação significativa da força normal foi captada pelo multímetro que, junto com um circuito eletrônico, projetado e montado [22], ofereceram uma precisão de $N = 0,04$ N. Outra possibilidade para explicar este fenômeno está relacionada ao tamanho do material abrasivo: as marcas de rolamento são provenientes de partículas abrasivas relativamente menores, que penetram nos riscos já formados por outras partículas abrasivas, de maiores dimensões, causando assim, o movimento de rolamento, especialmente em condições de baixa força normal.

A Figura 4.8 [12] exhibe a ocorrência de “micro-rolling abrasion” para os casos em que a distância de deslizamento foi $S_6 = 100$ m. As Figuras 4.8a-4.8b e as Figuras 4.8c-4.8d apresentam imagens (em diferentes ampliações) de duas crateras de desgaste distintas, geradas sob $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, respectivamente. Comparando-se as Figuras 4.8b e 4.8d, é possível perceber a atuação de um nível relativamente elevado de “micro-rolling abrasion” para a menor força normal ($N_1 = 1,25$ N – Figura 4.8b), com referência à maior ($N_2 = 5$ N – Figura 4.8d). Na Figura 4.9 há a constatação da presença de “micro-rolling abrasion” em crateras de desgaste obtidas sob os diferentes valores de forças normais, para a distância de

³⁰ Uma excentricidade semelhante também foi observada por Gee e Wicks [53], mas, em uma faixa levemente menor, entre 20 μm e 24 μm .

deslizamento $S_1 = 10$ m. As Figuras 4.9a-4.9b correspondem aos experimentos conduzidos com $N_1 = 1,25$ N e, as Figuras 4.9c-4.9d, aos ensaios realizados sob $N_2 = 5$ N [12].

Figura 4.8. Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Força normal constante $N_1 = 1,25$ N; (c)-(d) força normal constante $N_2 = 5$ N. Distância de deslizamento $S_6 = 100$ m [12].

Figura 4.9. Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Força normal constante $N_1 = 1,25$ N; (c)-(d) força normal constante $N_2 = 5$ N. Distância de deslizamento $S_1 = 10$ m [12].

Uma comparação entre as Figuras 4.8 e 4.9 sugere que o nível de atuação de “micro-rolling abrasion” é diretamente proporcional à distância de deslizamento, sendo, relativamente menor, no início dos ensaios (Figura 4.9) e aumentando com o crescimento de S (Figura 4.8). Este comportamento está em perfeita concordância qualitativa com os casos em que desgaste abrasivo por riscamento e desgaste abrasivo por rolamento são, simultaneamente, observados sob “macro-escala” [12] (ver Figura 2.6).

Em ensaios realizados sob condições de força normal constante, a área projetada total da cratera de desgaste (A_t) aumenta com o tempo de ensaio, resultando em um decaimento contínuo da pressão e, conseqüentemente, numa tendência a diminuir o quociente A_g/A_t [23,38]. Em outras palavras, quando o valor de A_t é relativamente alto, é possível supor que há uma quantidade proporcional de partículas abrasivas entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova, participando do processo de desgaste e que, a força normal, agindo sobre cada partícula abrasiva é menor, favorecendo, assim, a atuação de desgaste abrasivo por rolamento.

A Figura 4.10 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito, em função do tempo de ensaio, para os diferentes valores de forças normais. Nesta figura, linhas de tendência foram traçadas para, aproximadamente, estabelecer os limites da região com os valores dos coeficientes de atrito experimentais. Duas grandezas, μ_{sup} e μ_{inf} , foram definidas como os valores das linhas de tendência superior e inferior, respectivamente, para $S_6 = 100 \text{ m}$ ($t_6 = 2.000 \text{ s}$) [12].

Através de Análise de Variância (ANOVA), foi observado que:

- (i) Para $N_1 = 1,25 \text{ N}$ (Figura 4.10a), os valores dos coeficientes de atrito, obtidos sob diferentes tempos de ensaio, são, estatisticamente, diferentes. Analisando-se todas as curvas de coeficiente de atrito, torna-se difícil comparar os menores com os maiores valores de μ ; estatisticamente, eles são diferentes e esta discrepância está, possivelmente, associada com a relativa elevada ocorrência de “micro-rolling abrasion” [12];
- (ii) Para $N_2 = 5 \text{ N}$ (Figura 4.10b), os valores dos coeficientes de atrito, obtidos sob diferentes tempos de ensaio, são, estatisticamente, iguais. Neste caso, analisando-se as curvas de coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio, é possível comparar os menores valores com os maiores valores de μ , pois eles são, estatisticamente, iguais. A baixa discrepância destes resultados, quando comparados aos resultados

gerados com $N_1 = 1,25$ N está possivelmente, associada com a relativa baixa intensidade de ação de “micro-rolling abrasion” [12].

Figura 4.10. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. (a) $N_1 = 1,25$ N; (b) $N_2 = 5$ N [12].

Os resultados acima confirmam a tendência visível nas Figuras 4.10a e 4.10b, em que a dispersão dos valores dos coeficientes de atrito, em função do tempo de ensaio, é maior para a menor força normal ($N_1 = 1,25$ N). Além disso, para ambos os valores de forças normais, $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, o coeficiente de atrito demonstra uma tendência de ser ligeiramente

maior no início dos ensaios, do que nos tempos finais [12]. Adicionalmente, acredita-se que, os instantes iniciais do ensaio determinam o valor médio do coeficiente de atrito ao longo do mesmo, condição esta, que pode estar relacionada à maneira com que as partículas abrasivas penetram entre a esfera e o corpo-de-prova.

4.3.2. Condições de Pressão Constante

Similarmente aos ensaios conduzidos sob condições de força normal constante, os resultados referentes aos experimentos realizados sob pressão constante indicaram, também, a ocorrência de “micro-rolling abrasion”, como ilustra a Figura 4.11, que exhibe resultados gerados com $S = 100$ m. Neste sentido, Cozza *et al.* [23] reportaram que a diminuição da pressão ocasiona um decaimento direto da relação A_g/A_t ; sendo assim, é possível dizer que a pressão é inversamente proporcional ao nível de atuação de “micro-rolling abrasion”. De fato, a Figura 4.11 [12] demonstra que a ocorrência de “micro-rolling abrasion” é menos pronunciada para o maior valor de pressão ($P_2 = 5,13$ MPa – Figura 4.11d), quando comparado ao menor ($P_1 = 1,85$ MPa – Figura 4.11b).

Figura 4.11. Atuação de “micro-rolling abrasion”. (a)-(b) Pressão constante $P_1 = 1,85$ MPa; (c)-(d) pressão constante $P_2 = 5,13$ MPa. Distância de deslizamento $S = 100$ m [12].

A Figura 4.12 [12] apresenta o comportamento do coeficiente de atrito, em função do tempo de ensaio, para os diferentes valores de pressão constante.

Figura 4.12. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Condições de pressão constante: $P_1 = 1,85 \text{ MPa}$ e $P_2 = 5,13 \text{ MPa}$ [12].

Por meio de Análise de Variância, foi observado que:

- (i) Para $P_1 = 1,85 \text{ MPa}$, os valores dos coeficientes de atrito, obtidos sob a distância de deslizamento de 100 m, são, estatisticamente, iguais [12];
- (ii) Para $P_2 = 5,13 \text{ MPa}$, os valores dos coeficientes de atrito, obtidos sob a distância de deslizamento de 100 m, são, estatisticamente, iguais [12].

Os resultados acima confirmam as propensões observadas na Figura 4.12, em que a dispersão nos valores dos coeficientes de atrito, para um dado valor de pressão constante, é muito menor do que em situações de força normal constante. É importante notar que, similar à Figura 4.10, diferentes faixas, de μ_{sup} à μ_{inf} , foram registradas para cada valor de pressão. Além disso, a menor dispersão das curvas da Figura 4.12 permite conceituar que os valores dos coeficientes de atrito foram, consistentemente, menores no caso da menor pressão constante ($P_1 = 1,85 \text{ MPa}$) do que para a maior ($P_2 = 5,13 \text{ MPa}$), como também publicado por Larsen-Basse [284]. Uma vez que o nível de ação de “micro-rolling abrasion” foi

significativamente menor nos casos de alta pressão (Figura 4.11d), os resultados apresentados na Figura 4.12 podem indicar que coeficientes de atrito, obtidos sob ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento, são menores do que nos casos em que há a atuação de desgaste abrasivo por riscamento. De fato, em consequência da elevada dispersão, a discreta primazia do coeficiente de atrito, observado no início dos ensaios realizados com força normal constante (Figura 4.10), em que o grau de “micro-rolling abrasion” é menor do que no fim, pode ser uma evidência adicional que baixas frações de desgaste abrasivo por rolamento estão associadas a elevados valores de coeficiente de atrito [12].

Com o intuito de contribuir para a normalização de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, Adachi e Hutchings [50], combinando diversos materiais de esfera de ensaio e corpo-de-prova, analisaram o comportamento ao desgaste do mesmo. De acordo com estes pesquisadores, as taxas de desgaste, observadas durante a atuação de desgaste abrasivo por riscamento, são fortemente dependentes das condições de ensaio e, consequentemente, desgaste abrasivo por rolamento é mais apropriado em situações em que a reprodutibilidade³¹ de resultados é necessária, como também constataram Bose e Wood [19]. Na realidade, não só a taxa de desgaste, mas também, o coeficiente de atrito, são influenciados, pelo modo de desgaste abrasivo e pela umidade [104,251,252,285-290].

Para os experimentos conduzidos sob força normal constante (Figura 4.10), a relação entre μ_{sup} e μ_{inf} foi de $\mu_{\text{sup}}/\mu_{\text{inf}} \cong 5$, para $N_1 = 1,25$ N, e $\mu_{\text{sup}}/\mu_{\text{inf}} \cong 2,5$, para $N_2 = 5$ N. Para os ensaios conduzidos sob condições de pressão constante (Figura 4.12), $\mu_{\text{sup}}/\mu_{\text{inf}} \cong 1,4$, para ambas pressões, $P_1 = 1,85$ MPa e $P_2 = 5,13$ MPa. A diminuição da dispersão das curvas $\mu = f(t)$, alcançada nos ensaios realizados sob pressão constante, pode ser uma indicação de que, este tipo de condição oferece possibilidades de contribuição, quanto à reprodutibilidade de resultados obtidos, quando o modo de desgaste abrasivo, observado em “macro-escala”, for riscamento. Entretanto, pesquisas futuras ainda são necessárias para confirmar esta hipótese e expandi-la para diferentes combinações de materiais de esfera de ensaio e corpo-de-prova. Além disso, atenções devem ser tomadas, quanto à ocorrência de “micro-rolling abrasion”, principalmente, em relação à habilidade deste tipo de ensaio reproduzir situações observadas em operações industriais [12].

Futuras pesquisas também podem contribuir para analisar outras hipóteses levantadas neste trabalho. Por exemplo, pode-se pesquisar a evolução do nível de atuação de “micro-

³¹ A reprodutibilidade dos parâmetros geométricos de uma cratera de desgaste não está relacionada somente às atuações dos modos de desgaste abrasivo, mas, também, à ocorrência de “ridging”, como proferido no Item 2.6.2..

rolling abrasion” em função do tempo de ensaio, sob condições de pressão constante. Em teoria, o grau de “micro-rolling abrasion” gerado no início do ensaio (“Ponto 2” – Figura 3.8) pode ser similar ao obtido no fim do experimento (“Ponto 3” – Figura 3.8). Além disso, é importante notar que a pesquisa aqui exposta, fornece algumas evidências que auxiliam a validação de hipóteses similares, relacionadas aos outros pontos da Figura 3.8: considerando os resultados reportados com a força normal constante $N_1 = 1,25$ N e pressão constante $P_1 = 1,85$ MPa, o nível de atuação de “micro-rolling abrasion” no “Ponto 1” (Figura 4.9b) é muito menor que o grau de ocorrência no “Ponto 3” (Figura 4.11b), que é próximo ao nível observado no “Ponto 4” (Figura 4.8b) [12].

4.3.3. Ocorrência de “ridging”

Alguns valores de coeficiente de atrito (por exemplo, $\mu \approx 1$, com referência à publicação de Gee e Wicks [53]), observados nesta Tese, sugerem evidências de ocorrências de “ridging”. Embora medições de resistência ao contato elétrico não tenham sido realizadas, quando o contato entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio ocorre, a geometria da cratera de desgaste é afetada e sua área projetada tende a ser “menos circular” (Figura 4.13 [53]).

Figura 4.13. Cratera de desgaste gerada sem a inserção de pasta abrasiva [53].

Tais desvios de circularidade não foram reportados nas crateras de desgaste geradas (ver Figura 4.7), e este fato dispõe evidências que o contato direto entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio não ocorreu durante os ensaios.

4.3.4. Influência dos modos de desgaste abrasivo sobre o coeficiente de atrito

Análises dos modos de desgaste abrasivo atuantes foram conduzidas seguindo os conceitos apresentados no Item 2.6.1. (Figura 2.38) [13,50]. Os quadrados (em cor

“vermelha”) na Figura 4.14 indicam em que região de desgaste abrasivo, as condições de ensaio estão localizadas.

Figura 4.14. Análises das atuações dos modos de desgaste abrasivo. (a) $N_1 = 1,25$ N e (b) $N_2 = 5$ N (verificações baseadas nos trabalhos de Adachi e Hutchings [13,50]).

Os experimentos conduzidos sob $N_2 = 5$ N estão, definitivamente, localizados dentro da área de atuação de desgaste abrasivo por riscamento e, os ensaios realizados com $N_1 = 1,25$ N, em uma região de transição entre os modos de desgaste. Estes resultados são capazes de justificar a relativa alta intensidade de “micro-rolling abrasion”, observado nas crateras de desgaste geradas com $N_1 = 1,25$ N, sendo importante destacar dois pontos:

- (i) Em pesquisas anteriores, Cozza [22], Cozza *et al.* [23,24,27] e Zeferino *et al.* [38] observaram que, durante a transição entre os modos de desgaste abrasivo, comumente observa-se a ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento no centro da cratera de desgaste e desgaste abrasivo por rolamento nas laterais, e não a atuação de desgaste abrasivo por rolamento ao longo dos riscos. Logo, não é sensato afirmar que

a presença de “micro-rolling abrasion” represente condições que favoreçam a transição entre os modos de desgaste abrasivo, como definido por Adachi e Hutchings [13,50];

- (ii) Todos os resultados reportados na Figura 2.38 [13,50] foram obtidos para uma distância de deslizamento específica ($S = 16$ m), menor do que valores selecionados para as pesquisas desta Tese. Adicionalmente, Cozza *et al.* [23] e Zeferino *et al.* [38] mostraram que a área de atuação de desgaste abrasivo por riscamento diminui com o aumento da distância de deslizamento (*i.e.*, com o aumento do tempo de ensaio), devido a queda da pressão.

4.4. Considerações estatísticas

Durante esta pesquisa, além dos próprios resultados aqui expostos, foi observado que, em ensaios de desgaste abrasivo, o coeficiente de atrito apresenta uma ampla faixa de valores, devido a diversos fatores:

- i) *materiais de corpo-de-prova;*
- ii) *materiais abrasivos;*
- iii) *modos de desgaste abrasivo;*
- iv) *condições de ensaio;*
- v) *configurações de equipamentos.*

Mesmo com as oscilações das curvas de $\mu = f(t)$, observadas nas Figuras 4.10 e 4.12, análises de “Dados Discrepantes” mostraram que acima de 67% dos resíduos padronizados (z) situaram-se entre -1 e 1 e, 95%, entre -2 e 2 , como exhibe a Figura 4.15. Estes números são importantes, pois, mostram que a discrepância do comportamento do coeficiente de atrito, em função do tempo de ensaio, está relacionada a fenômenos intrínsecos do processo de desgaste.

Figura 4.15. Análise de Dados Discrepantes. Condições de força normal constante: (a) $N_1 = 1,25$ N e (b) $N_2 = 5$ N.

Capítulo 5

Resultados e Discussão – Pesquisas Definitivas

5.1. Importância da anulação da excentricidade da esfera de ensaio

Em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, o anulamento do desalinhamento da esfera é importante, visto que, uma excentricidade entre 20-24 μm , como relatado por Gee e Wicks [53], pode influenciar os resultados obtidos, principalmente, a medição do coeficiente de atrito. A justificativa desta afirmação está sustentada na seguinte análise: considerando que, em muitas pesquisas relacionadas a ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, o tamanho médio das partículas abrasivas é de, aproximadamente 4 μm [13,23,27,35,46,50], uma excentricidade compreendida entre 20-24 μm é 5 a 6 vezes maior do que as próprias partículas abrasivas. Consequentemente, em cada rotação da esfera de ensaio, a mesma poderá estar, na maior parte do tempo, fora de contato com o corpo-de-prova. Além disso, se as partículas abrasivas apresentarem tamanho médio de 1 μm ou 2 μm , como é reportado na literatura [46], esse problema se agrava.

A Figura 5.1 descreve a questão da esfera estar em contato, ou não, com o corpo-de-prova³².

Figura 5.1. Esfera (a) sem excentricidade e (b) com excentricidade.

³² É importante relembrar que, a rigor, sem a ocorrência de “ridging”, assunto enfatizado no Item 2.6.2., a esfera não permanece diretamente em contato com o corpo-de-prova, estando as partículas entre estes elementos, como esquematizado na Figura 2.7.

Na Figura 5.1a está a esquematização de uma esfera com excentricidade nula, situação na qual a mesma não se afasta do corpo-de-prova; a Figura 5.2a ilustra o caso em que, devido ao seu desalinhamento, a esfera desloca-se do contato com o sistema tribológico “partículas abrasivas + corpo-de-prova”.

Na condição (a), há somente “rotação” da esfera de ensaio, enquanto que, na condição (b), a mesma está munida de “rotação + translação”.

Antes do cancelamento do batimento da esfera de ensaio, tentou-se conduzir os ensaios com a excentricidade medida. Entretanto, as curvas de N e T apresentaram comportamentos senoidais, o que poderia tornar inviável a análise e interpretação dos resultados obtidos, ou mesmo gerar dados sem qualquer rigor científico.

5.2. Comportamento do coeficiente de atrito sob condições de “força normal constante” e “pressão constante” – gráficos de $\mu = f(t)$

As Figuras 5.2-5.19 apresentam o comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio (ou, distância de deslizamento – S), para as diferentes condições de ensaio estabelecidas para “força normal constante”; as Figuras 5.20-5.25 referem-se aos experimentos conduzidos sob “pressão constante”. Nestas figuras, “AD” significa “água destilada” e, para cada uma, há imagens dos modos de desgaste abrasivo atuantes. É importante mencionar que, com exceção das Figuras 5.3 e 5.4, em que a escala do coeficiente de atrito está compreendida entre “0” (zero) e “2”, nas demais foi definido o valor máximo de $\mu = 1$. Para tais figuras, foi definido $\mu = 2$ devido aos valores dos picos do coeficiente de atrito registrados.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.2. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ - $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.3. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ - $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.4. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ - $S_3 = 100 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.5. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ - $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.6. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ - $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.7. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.8. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ - $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.9. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio:
 $N_1 = 0,5 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.10. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_1 = 0,5 \text{ N}$ - $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ - $S_3 = 100 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.11. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ – $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.12. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ - $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ - $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.13. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ - $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ - $S_3 = 100 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.14. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ - $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ - $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.15. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ - $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ - $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.16. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ – $S_3 = 100 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.17. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ - $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ - $S_1 = 10 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.18. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$ – $S_2 = 32 \text{ m}$.

Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.
Ocorrência de “micro-rolling abrasion”.
Mesma cratera de desgaste sob diferentes escalas.

Figura 5.19. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Condições de ensaio: $N_2 = 1,25 \text{ N}$ – $C_3 = 37,5\%$ SiC – $62,5\%$ AD – $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.20. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.21. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.22. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ – $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.23. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_2 = 1,54 \text{ MPa}$ – $C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$. (a)-(b) $S_1 = 10 \text{ m}$ e (c)-(d) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.24. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_2 = 1,54$ MPa – $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD. (a)-(b) $S_1 = 10$ m e (c)-(d) $S_3 = 100$ m.

Figura 5.25. Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio.
 Condições de ensaio: $P_2 = 1,54$ MPa – $C_3 = 37,5\%$ SiC – $62,5\%$ AD. (a)-(b) $S_1 = 10$ m e (c)-(d) $S_3 = 100$ m.

Para facilitar a interpretação e a discussão dos resultados obtidos, gráficos de $\mu = f(t)$, gerados sob as diferentes condições de “força normal constante” e, já apresentados nas Figuras 5.2-5.19, foram selecionados, agrupados e exibidos, novamente, nas Figuras 5.26-5.31.

Na Figura 5.26, referente à condição “ $N_1 = 0,5 \text{ N} + C_1 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ ”, nota-se que entre 2 e 3 minutos (Figuras 5.26a e 5.26c) e, a partir de 8 minutos (Figura 5.26b), houve uma turbulência no contato “corpo-de-prova – partículas abrasivas – esfera”. Na Figura 5.26c, que mostra o gráfico de $\mu = f(t)$ para $t_3 = 33 \text{ min } 20 \text{ s}$ ($S_3 = 100 \text{ m}$), foram observados picos periódicos de μ , que se repetiam a cada 2 min 30 s, aproximadamente.

Assim como mostrado na Figura 5.26, a Figura 5.27, que exhibe os resultados obtidos com “ $N_2 = 1,25 \text{ N} + C_2 = 5\% \text{ SiC} - 95\% \text{ AD}$ ”, observa-se, também, picos periódicos de μ , mas com intervalos ligeiramente menores, 2 minutos, aproximadamente (Figura 5.27c).

Seguindo esta diminuição, aumentando-se a concentração da pasta abrasiva para 25% SiC, tanto para a força normal de 0,5 N, quanto para 1,25 N, a periodicidade de tais turbulências no coeficiente de atrito diminui para intervalos menores que 1 minuto (Figuras 5.28 e 5.29). Além disso, para a condição “ $N_1 = 0,5 \text{ N} + C_2 = 25\% \text{ SiC} - 75\% \text{ AD}$ ”, praticamente não houve a ocorrência de picos de μ .

Por outro lado, contrariando esta tendência descendente, quando foi adotado 37,5% SiC na concentração da pasta abrasiva, o intervalo de ocorrência deste fenômeno voltou a aumentar para 2 min 30 s, aproximadamente, como pode ser observado nas Figuras 5.30 e 5.31.

Nas condições de “pressão constante”, os picos de μ diminuíram de forma significativa, como pode ser observado nas Figuras 5.20-5.25. Em geral, o comportamento de $\mu = f(t)$ apresentou maior estabilidade, quando comparado à evolução do coeficiente de atrito desenvolvida sob condições de “força normal constante” devido, provavelmente, ao relativo menor nível de atuação de “micro-rolling abrasion”, como podem ser analisadas, visualmente, as Figuras 5.2-5.25.

Tal responsabilidade dada ao fenômeno “micro-rolling abrasion” sobre os picos de μ será explicada posteriormente, com base em resultados extraídos da literatura.

Figura 5.26. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5$ N e $C_1 = 5\%$ SiC – 95% AD. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10$ m, (b) $S_2 = 32$ m e (c) $S_3 = 100$ m.

Figura 5.27. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25$ N e $C_1 = 5\%$ SiC – 95% AD. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10$ m, (b) $S_2 = 32$ m e (c) $S_3 = 100$ m.

Figura 5.28. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5$ N e $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10$ m, (b) $S_2 = 32$ m e (c) $S_3 = 100$ m.

Figura 5.29. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25$ N e $C_2 = 25\%$ SiC – 75% AD. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10$ m, (b) $S_2 = 32$ m e (c) $S_3 = 100$ m.

Figura 5.30. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Figura 5.31. Eixo horizontal: tempo de ensaio; eixo vertical: coeficiente de atrito. Ensaios realizados sob “força normal constante”. $N_2 = 1,25 \text{ N}$ e $C_3 = 37,5\% \text{ SiC} - 62,5\% \text{ AD}$. Distâncias de deslizamento: (a) $S_1 = 10 \text{ m}$, (b) $S_2 = 32 \text{ m}$ e (c) $S_3 = 100 \text{ m}$.

Dentro dos propósitos da pesquisa desta Tese de Doutorado, não está incluso o estudo dos picos (ou, “spikes”, na Língua Inglesa) registrados nos gráficos de $\mu = f(t)$, mas, tal entendimento pode ser adquirido por Análise Espectral. Encaminhando-se por esta linha, o pesquisador interessado estaria estudando não só a parcela dinâmica do tribosistema mas, também, toda a dinâmica do próprio equipamento, devendo ser considerado, em paralelo, a forma com que os dados são obtidos.

Além disso, outro fator que pode ser considerado, em futuras análises dos picos de μ , refere-se a uma possível influência da frequência de gotejamento da pasta abrasiva sobre o sistema tribológico.

A inserção periódica de composto abrasivo entre a esfera e o corpo-de-prova pode gerar turbulências no tribosistema, captadas pelas células de carga. Em trabalhos posteriores, esta linha de estudo poderá vir a explicar ou, no mínimo, auxiliar o esclarecimento da periodicidade de atuação dos picos de μ . Além disso, seguindo esta conduta de pesquisa, outras variáveis são designadas a serem enfatizadas, como, por exemplo, a distribuição granulométrica das partículas abrasivas que constituem uma gota e sua respectiva concentração são incógnitas a serem consideradas.

Entretanto, as ascensões periódicas do coeficiente de atrito podem, também, ser discutidas baseando-se nos tipos de movimentos (“rolamento” ou “deslizamento”) que as partículas abrasivas venham adquirir durante o processo de desgaste.

Aproveitando o ensejo dado no Item 2.9.3.4. (Influência do tipo de movimento das partículas abrasivas sobre o coeficiente de atrito), o trabalho de Fang *et al.* [269] reportou que, sob desgaste abrasivo, a dispersão do coeficiente de atrito, em função do tempo de ensaio, é relativamente maior para o “rolamento”, quando relacionado ao movimento de “deslizamento” da partícula abrasiva, como compara a Figura 5.32.

Figura 5.32. Continuação.

Figura 5.32. Comportamento do coeficiente de atrito sob condições de desgaste abrasivo por (a) riscamento e (b) rolamento. Tipo de ensaio: “single-particle wear test” [269]. *Figura editada.*

Analisando-se os gráficos das Figuras 5.2-5.19, é possível observar dois comportamentos distintos que, neste trabalho, serão definidos como “Comportamento Estável” e “Comportamento Indefinido”, sendo exemplificados pela Figura 5.33.

Figura 5.33. Definições das regiões de atuações dos “Comportamento Estável” e “Comportamento Indefinido”.

Comparando-se os resultados publicados por Fang *et al.* [269], com os resultados levantados para esta Tese, em que foram introduzidos os conceitos de regiões de comportamentos “estável” e “indefinido”, é possível que tais áreas sejam sobreposições dos comportamentos de $\mu = f(t)$ relatados por Fang *et al.* [269] para desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento”.

Como nas crateras de desgaste, atuaram desgastes abrasivos por “riscamento” e “micro-rolling abrasion” (“micro-rolamento”, que será discutido no Item 5.4.3. Atuações dos modos de desgaste abrasivo), sugere-se que a região de “Comportamento Estável” esteja relacionada à parcela de “riscamento” e, a região de “Comportamento Indefinido”, à parcela de “micro-rolling abrasion”.

É importante enfatizar que, qualitativamente, a maior predominância de atuação foi de desgaste abrasivo por riscamento, o que justifica, em todos os gráficos, uma continuidade de atuação da região de “Comportamento Estável”. Por outro lado, as áreas de “Comportamento Indefinido”, embora apresentando picos com frequências nitidamente definidas, apresenta uma quantidade de pontos adquiridos relativamente baixa, quando comparados aos sinais inclusos na região de “Comportamento Estável”, o que pode ser correlacionado à parcela comparativamente baixa de ação de desgaste abrasivo por “micro-rolamento”.

5.3. Análise comparativa estatística do coeficiente de atrito

Abaixo, estão os resultados estatísticos obtidos por ANOVA – Análise de Variância – das curvas de coeficiente de atrito.

5.3.1. Força Normal Constante

Força Normal Constante – grupos independentes.

- 1) Para $N_1 = 0,50$ N: os valores dos coeficientes de atrito obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais;
- 2) Para $N_2 = 1,25$ N: os valores dos coeficientes de atrito obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais.

Força Normal Constante – comparação entre grupos.

Para $N_1 = 0,50$ N e $N_2 = 1,25$ N os valores dos coeficientes de atrito, obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais.

5.3.2. Pressão Constante

Pressão Constante – grupos independentes.

- 1) Para $P_1 = 0,88$ MPa: os valores dos coeficientes de atrito, obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais;
- 2) Para $P_2 = 1,54$ MPa: os valores dos coeficientes de atrito, obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais.

Pressão Constante – comparação entre grupos.

Para $P_1 = 0,88$ MPa e $P_2 = 1,54$ MPa os valores dos coeficientes de atrito, obtidos para as diferentes combinações de “distância de deslizamento – S ” e “concentração de pasta abrasiva – C ” são, estatisticamente, iguais.

5.3.3. Análise Comparativa Global de Resultados

Força Normal Constante + Pressão Constante – análise comparativa global.

As curvas de coeficiente de atrito, obtidas sob as condições de “força normal constante” e “pressão constante” são, estatisticamente, iguais, independente da combinação entre “distância de deslizamento” e “concentração de pasta abrasiva”.

As Figuras 5.34 e 5.35, referentes às condições de “força normal constante” e “pressão constante”, respectivamente, fortalecem os resultados estatísticos, obtidos por Análise de Variância. Nota-se que, independente da força normal ou pressão, o coeficiente de atrito permaneceu estatisticamente semelhante com a variação do tempo de ensaio.

Figura 5.34. Comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os diferentes valores de força normal e concentração de pasta abrasiva.

Figura 5.35. Comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os diferentes valores de pressão e concentração de pasta abrasiva.

5.4. Influência da “força normal constante” e “pressão constante” sobre o coeficiente de atrito

Na análise literária, referente à reação do coeficiente de atrito, frente à variação ascendente da força normal (Item 2.9.3.1. Influência da força normal sobre o coeficiente de atrito), constatou-se que μ é proporcional a N , divergindo dos resultados levantados neste

trabalho, em que o coeficiente de atrito independeu a força normal e pressão, como constatou a análise estatística.

Para explicar tal comportamento, três linhas de análises foram seguidas: i) *comportamento mecânico do corpo-de-prova*, ii) *passo entre riscos* (para as atuações de desgaste abrasivo por “riscamento”) e iii) *atuações dos modos de desgaste abrasivo*, como serão discutidas a seguir.

5.4.1. *Comportamento mecânico do material do corpo-de-prova*

A explicação para esta invariabilidade pode ser desenvolvida com base nas diferentes magnitudes de forças normais aplicadas nos ensaios de desgaste abordados na Revisão Bibliográfica e os valores adotados nesta pesquisa.

Na Revisão Bibliográfica referente a coeficiente de atrito, que focou, principalmente, ensaios de configuração “roda-de-borracha” (“DSRW – Dry Sand Rubber Wheel”), a faixa de valores de força normal variou entre 15 N e 100 N. Trata-se, portanto, de valores relativamente maiores do que os adotados neste trabalho, 0,5 N e 1,25 N.

Em desgaste abrasivo, maiores forças normais resultam em riscos mais profundos gerados pelas partículas abrasivas, o que dificulta a retirada de material e, conseqüentemente, eleva a força tangencial. Tomando como exemplo as pesquisas conduzidas por Dube e Hutchings [250] e Ramos [93], é possível notar que variações na força normal entre 15 N e 100 N ocasionaram ascensões relativamente menores no coeficiente de atrito, na magnitude de 2 vezes, enquanto que força normal aumentou mais de 6 vezes.

Por outro lado, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, tanto os valores das forças normais, quanto as partículas abrasivas são relativamente muito menores, causando, conseqüentemente, menores penetrações e, provavelmente, valores de μ insensíveis à faixa de valores de N .

Além disso, outro aspecto importante que deve ser focado, refere-se ao encruamento do material do corpo-de-prova, enfatizado por Ramos [93]. Aplicações de forças normais na faixa de 15-100 N ocasionam maiores níveis de encruamento do que forças normais na faixa de 0,5 N e 1,25 N, valores utilizados nesta Tese.

Com isso, é coerente admitir que, em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa e, considerando-se o material de corpo-de-prova adotado neste trabalho, o efeito do encruamento do material do corpo-de-prova não ocorra ou seja desprezível sobre o coeficiente de atrito. Este comportamento pode estar relacionado aos próprios valores de ΔN ou à própria

célula de carga direcionada à medição da força tangencial, podendo esta, não ter resolução (sensibilidade) suficiente para registrar tal variação de T .

5.4.2. Passo entre riscos

Observando-se imagens das crateras de desgaste por Microscopia Óptica, reportou-se que, na grande maioria das crateras de desgaste, macroscopicamente, prevaleceu a presença de desgaste abrasivo por riscamento, sendo possível medir o passo entre riscos (λ_{pr}). Tal procedimento foi executado com o auxílio do programa de CAD (Computer Aided Design) AutoCAD 2000, por intermédio de imagens adquiridas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Crateras de desgaste, obtidas sob as diferentes condições de ensaio, detalhadas no Capítulo 3, foram analisadas, como exemplifica a Figura 5.36, na qual é definido, geometricamente, um espaço entre riscos, λ_{pr} . O valor de λ_{pr} , para uma dada condição de ensaio, foi estabelecido pelo cálculo da média aritmética de medições realizadas ao longo de fotografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Figura 5.36. Sistemática de medição de λ_{pr} – passo entre riscos.

A Tabela 5.1 apresenta o valor médio de λ_{pr} para as diferentes condições de ensaio, envolvendo força normal, pressão, distância de deslizamento e concentração de pasta abrasiva. Na Figura 5.37 têm-se o gráfico de $\mu = f(\lambda_{pr})$, em que, cada valor de λ_{pr} , exposto na Tabela 5.1, está associado à média aritmética das três curvas de μ obtidas nas diferentes condições de “ $N + C + S$ ” e “ $P + C + S$ ”.

Tabela 5.1. Valores de λ_{pr} para as condições de “força normal constante” e “pressão constante” (valores de λ_{pr} em $[\mu\text{m}]$ – em azul).

Força Normal Constante						
$N \downarrow / C \Rightarrow$	$C_1: 5\% \text{ SiC}$		$C_2: 25\% \text{ SiC}$		$C_3: 37,5 \text{ SiC}$	
$N_1 = 0,5 \text{ N}$	$S_1 = 10 \text{ m}$	2,45	$S_1 = 10 \text{ m}$	1,76	$S_1 = 10 \text{ m}$	1,97
	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,07	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,46	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,45
	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,93	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,85	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,89*
$N_2 = 1,25 \text{ N}$	$S_1 = 10 \text{ m}$	1,84	$S_1 = 10 \text{ m}$	3,05	$S_1 = 10 \text{ m}$	3,36
	$S_2 = 32 \text{ m}$	3,12	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,17	$S_2 = 32 \text{ m}$	4,01
	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,24	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,96	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,81

Pressão Constante						
$N \downarrow / C \Rightarrow$	$C_1: 5\% \text{ SiC}$		$C_2: 25\% \text{ SiC}$		$C_3: 37,5 \text{ SiC}$	
$P_1 = 0,88 \text{ MPa}$	$S_1 = 10 \text{ m}$	2,52	$S_1 = 10 \text{ m}$	1,89	$S_1 = 10 \text{ m}$	2,67
	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,97	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,51	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,13
	$S_3 = 100 \text{ m}$	1,81	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,78	$S_3 = 100 \text{ m}$	1,92
$P_2 = 1,54 \text{ MPa}$	$S_1 = 10 \text{ m}$	2,47	$S_1 = 10 \text{ m}$	2,11	$S_1 = 10 \text{ m}$	3,26
	$S_2 = 32 \text{ m}$	3,11	$S_2 = 32 \text{ m}$	3,23	$S_2 = 32 \text{ m}$	2,77
	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,01	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,88	$S_3 = 100 \text{ m}$	2,34

Máximo Desvio-Padrão de λ_{pr} : 0,41.

* Nestes ensaios, a incidência predominante, sob “macro-escala”, foi de desgaste abrasivo por “rolamento”. As medidas de λ_{pr} foram tomadas a partir de riscos remanescentes localizados, principalmente, no centro das crateras de desgaste.

Figura 5.37. Gráfico de $\mu = f(\lambda_{pr})$. Condições de “força normal constante” e “pressão constante”.

Nenhuma correlação foi observada entre λ_{pr} e μ . Entretanto, análises estatísticas por Análise de Variância mostraram que, independente da condição de ensaio, λ_{pr} é, estatisticamente, igual para todos os casos.

5.4.3. Atuações dos modos de desgaste abrasivo

Atuações de “rolamento”, “riscamento” e “micro-rolling abrasion”.

As Figuras 5.38 e 5.39 exibem imagens, obtidas por Microscopia Óptica, de crateras de desgaste geradas sob condições de “força normal constante” e “pressão constante”, respectivamente.

Figura 5.38. Cratera de desgaste gerada sob condição de “força normal constante”.

Figura 5.39. Cratera de desgaste gerada sob condição de “pressão constante”.

Para ambos valores de “força normal constante” ($N_1 = 0,5 \text{ N}$ e $N_2 = 1,25 \text{ N}$) e “pressão constante” ($P_1 = 0,88 \text{ MPa}$ e $P_2 = 1,54 \text{ MPa}$), com as concentrações de pasta abrasiva de 5% SiC (considerada relativamente baixa), 25% SiC e 37,5% SiC (consideradas relativamente elevadas), imagens captadas em um Microscópio Óptico revelaram, novamente, somente a atuação de desgaste abrasivo por riscamento. Entretanto, análises conduzidas por Microscopia Eletrônica de Varredura mostraram, também, a atuação de “micro-rolling abrasion”, já reportado nas “Pesquisas Iniciais” e publicado por Cozza *et al.* [12].

Antes dos resultados apresentados neste capítulo, havia o receio de que o modo “micro-rolling abrasion” fosse efeito da excentricidade da esfera de ensaio, até então, compreendida entre 21-27 μm . Com isso, se houvesse alguma relação entre “excentricidade da esfera de ensaio” e “micro-rolling abrasion”, tal fenômeno não seria um resultado intrínseco do processo de desgaste micro-abrasivo, e sim, um dado de saída relacionado à condição de ensaio.

Porém, a nova detecção da ocorrência de “micro-rolling abrasion” é uma confirmação de que este fenômeno realmente pode estar presente em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Esta conceituação pode ser um avanço científico relevante para a comunidade envolvida com pesquisas tribológicas, visto que, até então, os modos de desgaste abrasivo eram classificados somente em “desgaste abrasivo por riscamento” e “desgaste abrasivo por rolamento”.

A Figura 2.6 exemplificou a atuação, simultânea, de desgaste abrasivo por “rolamento” e “riscamento”, situação que denota uma condição de transição entre estes modos de desgaste e a possível quantificação, distinta, das áreas “ A_r ” e “ A_g ”. A diferenciação entre o exemplo dado na Figura 2.6 e o “micro-rolling abrasion” (Figuras 4.7-9, 4.11 e 5.2-25), está no fato de que, no “micro-rolling abrasion”, os modos “rolamento” e “riscamento” agem em conjunto, “sobrepostos” em uma mesma área.

Diferente das condições de acomodação das partículas abrasivas que conduzem aos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” ou “rolamento” (“incrustadas” ou “soltas”, conforme esquematização dada na Figura 2.4 – Capítulo 2), para a ocorrência de “micro-rolling abrasion”, deve haver partículas incrustadas no contra-corpo, responsáveis pela geração de desgaste abrasivo por “riscamento”, e partículas livres para rolar, que ocasionam o intitulado “micro-rolling abrasion”.

As partículas abrasivas de maiores dimensões, aderidas ao contra-corpo, ficam sujeitas a ação de forças normais relativamente maiores, adquirindo somente movimento de “translação” e gerando, conseqüentemente, desgaste abrasivo por “riscamento”. Em contra-

partida, os elementos menores, que sustentam cargas normais de menores ordens, munem-se de movimentos de “translação + rotação”, ocasionando “micro-rolling abrasion”, como sugerido na Figura 5.40.

$$\Delta N_1 \gg \Delta N_2$$

ΔN_1 : responsável pelo “riscamento”

ΔN_2 : responsável pelo “micro-rolling abrasion”

Modo “riscamento”: somente translação da partícula abrasiva.
Modo “micro-rolling abrasion”: a partícula abrasiva desenvolve “translação + rotação”.

Figura 5.40. Esquematização do princípio de ocorrência do fenômeno “micro-rolling abrasion”.

O fato de “elevadas forças normais + baixas concentrações de pasta abrasiva” favorecerem desgaste abrasivo por riscamento e, sob “baixas forças normais + elevadas concentrações de pasta abrasiva” haver o predomínio do modo rolamento, não é uma regra absoluta. Além destes parâmetros, há outros fatores que influenciam as atuações dos modos de desgaste abrasivo, como discutido detalhadamente na Revisão Bibliográfica exposta no Capítulo 2, além dos trabalhos de Adachi e Hutchings [13,50]. Tomando-se as condições de ensaio definidas neste trabalho e com base nas próprias publicações de Adachi e Hutchings [13,50], foram conduzidas análises das severidades de contato (S_C), para as condições de “força normal constante”, como exhibe a Figura 5.41.

Figura 5.41. Análise qualitativa das atuações dos modos de desgaste abrasivo – condições de “força normal constante” (a partir das Referências [13,50]).

As marcações na Figura 5.41 indicam a região (“Riscamento” ou “Rolamento”) que as condições de ensaio favorecem; há uma linha de separação entre os dois modos de desgaste abrasivo, que no trabalho de Adachi e Hutchings [13,50] (Figura 2.38), separou as ocorrências dos modos de desgaste abrasivo.

Em alguns casos, o ábaco de Adachi e Hutchings [13,50] prevê a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento mas, analisando-se as crateras de desgaste por Microscopia Óptica, observou-se somente a atuação de desgaste abrasivo por riscamento, contradizendo os estudos previsivos (ao menos, em escala macroscópica).

Um ponto importante que deve ser considerado nos gráficos de Adachi e Hutchings [13,50] refere-se à distância de deslizamento, que foi negligenciada por estes autores. Os pontos foram definidos para a distância de deslizamento específica de 16 metros, valor diferente aos definidos para este trabalho. Adicionalmente, no Capítulo 4, foi explicado que, com o aumento da distância de deslizamento, o modo de desgaste abrasivo transita de “riscamento” para “rolamento”, devido à diminuição da pressão no sistema tribológico (Figura 4.5). Ou seja, uma condição que, inicialmente, está na região de “desgaste abrasivo por riscamento” pode, com o aumento da distância de deslizamento, migrar para a área de “desgaste abrasivo por rolamento”.

Possível influência dos modos de desgaste abrasivo sobre o coeficiente de atrito.

Na literatura, não foi encontrado qualquer trabalho que focasse a influência da concentração da pasta abrasiva sobre o coeficiente de atrito.

Pelos resultados obtidos, a conclusão é que, de imediato, a concentração da pasta abrasiva não apresenta influência sobre o coeficiente de atrito, dentro da faixa de valores analisados neste trabalho.

Para explicar a similaridade do coeficiente de atrito com o aumento da concentração da pasta abrasiva, uma das considerações abordadas foi: entre “água destilada” e “partículas abrasivas de SiC”, o que gera menor coeficiente de atrito no sistema tribológico é a “água destilada”, visto que a mesma age como um agente “lubrificante”, e não como o elemento que causa o desgaste no corpo-de-prova.

Com isso, uma menor concentração de pasta abrasiva – portanto, maior quantidade de “água destilada” e menor de “partículas abrasivas de SiC” – poderia favorecer um valor menor de coeficiente de atrito. Por outro lado, aumentando-se a concentração da pasta abrasiva – diminuindo-se, portanto, o volume de “água destilada” e, aumentando-se o volume de “partículas abrasivas de SiC” – a tendência seria para o aumento do coeficiente de atrito.

Outro fator que pode ter agido sobre a inalterabilidade estatística do coeficiente de atrito, foram as atuações dos modos de desgaste abrasivo. Fazendo-se uma comparação qualitativa entre os modos “riscamento” e “rolamento”, pode-se dizer que a retirada de material pelo modo “riscamento” seria mais agressivo do que a perda de material por “rolamento” das partículas abrasivas, o que ocasionaria maiores forças tangenciais e, consequentemente, maiores coeficientes de atrito (para uma força normal constante).

Unindo as duas explicações sugeridas neste texto, menores concentrações de pasta abrasiva favoreceriam a atuação de desgaste abrasivo por “riscamento”, mas, em contra partida, haveria um volume maior de líquido (no caso, água destilada), que tende a lubrificar, e não desgastar o sistema tribológico. Por outro lado, maiores concentrações de pasta abrasiva favoreceriam a ocorrência de desgaste abrasivo por “rolamento”, mas há uma quantidade menor de água destilada, que age como agente lubrificante no sistema tribológico, e um volume maior de partículas abrasivas que atiram com o corpo-de-prova.

5.5. Relação entre taxa de desgaste e coeficiente de atrito

As Figuras 5.42 e 5.43 apresentam as curvas de $V = f(S)$ para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”, respectivamente.

Figura 5.42. Variação do volume de desgaste em função da distância de deslizamento, para as condições de ensaio de “força normal constante”. Máximo Desvio-Padrão de V : $0,003 \text{ mm}^3$.

Figura 5.43. Variação do volume de desgaste em função da distância de deslizamento, para as condições de ensaio de “pressão constante”. Máximo Desvio-Padrão de V : $0,04 \text{ mm}^3$.

Na Tabela 5.2 estão as equações, os valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson – R^2 – e a respectiva taxa de desgaste. É importante ressaltar que todos os ajustes foram realizados a partir de três pontos, o que ocasiona tendências de serem obtidos valores de R^2 relativamente elevados, próximos da unidade.

Como os valores de R^2 são relativamente elevados, o que caracteriza tendências próximas a uma reta e a consideração da obtenção do Regime Permanente Desgaste, conforme explicação transcrita no Item 2.4. Regime Permanente de Desgaste – RPD, a taxa de desgaste pode ser obtida derivando-se cada equação das curvas referentes às Figuras 5.42 e 5.43 $\left(Q = \frac{dV}{dS} \right)$.

Tabela 5.2. Taxa de desgaste para as condições de “força normal constante” e “pressão constante” (em azul).

Força Normal Constante				
$N \downarrow$	C	Equação $V = f(S)$	R^2	Q [mm ³ /m]
$N_1 = 0,5 \text{ N}$	C_1 : 5% SiC	$V = 0,00013S - 0,00143$	0,99	0,00013
	C_2 : 25% SiC	$V = 0,00017S - 0,00149$	0,99	0,00017
	C_3 : 37,5% SiC	$V = 0,00025S - 0,00102$	0,98	0,00025
$N_2 = 1,25 \text{ N}$	C_1 : 5% SiC	$V = 0,00019S - 0,00173$	0,99	0,00019
	C_2 : 25% SiC	$V = 0,00029S - 0,00161$	0,99	0,00029
	C_3 : 37,5% SiC	$V = 0,00041S - 0,00097$	0,99	0,00041
Pressão Constante				
$P \downarrow$	C	Equação $V = f(S)$	R^2	Q [mm ³ /m]
$P_1 = 0,88 \text{ MPa}$	C_1 : 5% SiC	$V = 0,00046S - 0,00519$	0,99	0,00046
	C_2 : 25% SiC	$V = 0,00067S - 0,00996$	0,98	0,00067
	C_3 : 37,5% SiC	$V = 0,00076S - 0,01074$	0,98	0,00076
$P_2 = 1,54 \text{ MPa}$	C_1 : 5% SiC	$V = 0,00091S - 0,01097$	0,98	0,00091
	C_2 : 25% SiC	$V = 0,00082S - 0,00538$	0,99	0,00082
	C_3 : 37,5% SiC	$V = 0,00123S - 0,00893$	0,99	0,00123

Tomando-se os valores de Q calculados, é possível construir os gráficos de $Q = f(C)$ para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”, como mostra as Figuras 5.44 e 5.45, respectivamente.

Figura 5.44. Comportamento da taxa de desgaste em função da concentração da pasta abrasiva, para as condições de "força normal constante". Máximo Desvio-Padrão de Q : $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.

Figura 5.45. Comportamento da taxa de desgaste em função da concentração da pasta abrasiva, para as condições de "pressão constante". Máximo Desvio-Padrão de Q : $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.

Pelos gráficos de $V = f(S)$, observa-se uma ascensão do volume de desgaste com a "força normal" e "pressão". Embora a taxa de desgaste tenha variado com a "força normal constante", "pressão constante", "concentração da pasta abrasiva" e "tempo de ensaio - ou,

distância de deslizamento”, os valores de μ mantiveram-se inalterados frente às variações destas grandezas, demonstrando que, para as condições de ensaio estabelecidas para esta Tese, o coeficiente de atrito não apresentou qualquer relação com a taxa de desgaste.

Nas Figuras 5.44 e 5.45 (gráficos de $Q = f(C)$), nota-se que o volume de desgaste aumentou com o acréscimo da quantidade de partículas abrasivas de SiC (com o aumento do volume de material abrasivo presente no composto), e uma explicação possível para este comportamento está relacionada à quantidade de partículas abrasivas participantes do processo de desgaste: maiores valores de C introduziriam um número maior de partículas abrasivas entre a esfera e o corpo-de-prova, ou seja, inseririam uma quantidade maior de elementos que geram desgaste, aumentando, conseqüentemente, a taxa de desgaste. Contudo, esta explicação está baseada na suposição de que, durante o processo de desgaste, seja formada uma monocamada de partículas abrasivas sobre a superfície da cratera de desgaste.

5.6. Valores “aparente” e “real” do coeficiente de atrito

Como mencionado no Item 2.9.3. (Parâmetros de influência sobre o coeficiente de atrito), muitos fatores contribuem para a complexidade de análises de coeficiente de atrito em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Nestas variáveis, além do próprio tipo de movimentação das partículas abrasivas, está incluso o fato de que não há o contato direto entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova [29], devido à existência de três principais elementos envolvidos no sistema tribológico: i) *esfera de ensaio*, ii) *partículas abrasivas* e iii) *corpo-de-prova*, esquematizados na Figura 2.3 – Capítulo 2.

Considerando uma única partícula abrasiva, é possível supor que a relação T/N , em um contato específico (carregamento local) é significativamente dependente do tipo de movimento da partícula abrasiva, “rolamento” ou “deslizamento” [270], que é, justamente, o que Fang *et al.* [269] concluíram, como exibido na Figura 5.32. Entretanto, devido a maior discrepância do coeficiente de atrito, em função do tempo de ensaio, para a condição de desgaste abrasivo por rolamento, Fang *et al.* [269] consideraram a possibilidade de acatar a hipótese de que, devido a este comportamento, o maior coeficiente de atrito seja registrado para condição de desgaste abrasivo por rolamento. Este não é o consenso discutido ao longo desta Tese, uma vez que, como o padrão de movimento não é exatamente o mesmo para todas as partículas abrasivas participantes do processo de desgaste, flutuações no valor global do coeficiente de atrito podem ser esperadas, dependendo do número de partículas que “rolam” e

“deslizam”. Por consequência, é sensato supor que o valor “ T/N local” seja igual a “ T/N global” nas circunstâncias em que o padrão de movimento seja o mesmo para a grande maioria das partículas abrasivas.

Porém, a suposição de que “ T/N local” seja igual a “ T/N global” requer uma análise detalhada, considerando-se a força normal aplicada e a concentração da pasta abrasiva adotada – esta, por consequência, terá influência sobre as atuações dos modos de desgaste abrasivo. Seguindo este raciocínio, é importante referenciar a publicação de Gane e Skinner [291], sendo mencionado por estes pesquisadores que, para o coeficiente de atrito “aparente” – “macroscópico”, em que a parcela “adesiva” é dominante, a lei de Amontons é obedecida e, consequentemente, o coeficiente de atrito torna-se independente da força normal.

Tanto a “força normal” – N (aplicada) quanto a “força tangencial” – T (medida), são valores “aparentes”. Logo, todos os gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo expostos fornecem, na realidade, valores aparentes de μ , um parâmetro médio entre a força tangencial (T) medida e a força normal (N) aplicada, ou seja, um resultado de interações multi-partículas.

Considerando que a “força normal” (N – “aparente”) é dividida entre a quantidade de partículas abrasivas atuantes no processo de desgaste, tem-se, de fato, o valor efetivo da força normal agindo por partícula abrasiva (ΔN – “força normal efetiva”) e, por consequência, a “força tangencial efetiva” (ΔT). Destas grandezas, obtêm-se, realmente, o “coeficiente de atrito efetivo” – μ_{ef} (“real”) relacionado a cada partícula abrasiva.

Em 1977, os pesquisadores Maan e Broese Van Groenou [292] publicaram um trabalho enfatizando a questão do coeficiente de atrito originário de uma única partícula abrasiva. O modelamento destes autores iniciou-se por uma protuberância, transladando ao longo de um corpo-de-prova, submetida a uma força normal – ΔN , esquematizada na Figura 5.46. Junto à força tangencial – ΔT , origina-se uma força resultante de ΔN e ΔT que, neste texto, foi denominada “força interativa resultante” e simbolizado por F_{R-NT} .

Figura 5.46. Ações de ΔN , ΔT e F_{R-NT} . A partir da Referência [292].

Na Figura 5.46, pode ser observado que F_{R-NT} não necessita ser normal à superfície frontal (superfície de ataque) da partícula abrasiva. Com isso, decompondo F_{R-NT} , obtêm-se $F_{R-normal}$ e $F_{R-tangencial}$, que são, respectivamente, a “força interativa normal” e “força interativa tangencial” à superfície de ataque da partícula abrasiva. O material fluindo ao longo da superfície de contato com a partícula abrasiva gera uma tensão de cisalhamento, relacionada com $F_{R-tangencial}$; esta parcela é a principal contribuição de ΔT , em que um pequeno nível de “ploughing” é observado.

De fato, $F_{R-normal}$ e $F_{R-tangencial}$ deveriam ser utilizados para calcular o coeficiente de atrito entre a partícula abrasiva e o corpo-de-prova, o “coeficiente de atrito de Coulomb” – μ_{ef} (“real” – “coeficiente de atrito efetivo”). Entretanto, infelizmente, na prática, tal grandeza, atualmente, não é possível de ser quantificada em condições de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa (“o valor efetivo – real – do coeficiente de atrito relacionado a cada partícula abrasiva é, consequentemente, desconhecido”).

Entretanto, um breve estudo pode ser realizado analisando-se com mais detalhes o sistema tribológico de um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. Durante os testes atuam dois coeficientes de atrito distintos: o i) *coeficiente de atrito entre a esfera de ensaio e as partículas abrasivas* (μ_{EA}) e o ii) *coeficiente de atrito entre as partículas abrasivas e o corpo-de-prova* (μ_{ACP}); isto, desconsiderando o fluído da pasta abrasiva [293]. Consequentemente, agem duas forças tangenciais: i) T_{EA} e ii) T_{ACP} (Figura 5.47), referentes à μ_{EA} e μ_{ACP} , respectivamente [293].

Seguindo esta linha de análise, as forças tangenciais (T) medidas e os coeficientes de atrito (μ) calculados nesta Tese são, a rigor, as somatórias (as resultantes) de “ T_{EA} e T_{ACP} ” (Equação 5.1) e “ μ_{EA} e μ_{ACP} ” (Equação 5.2), respectivamente [293].

$$T = T_{EA} + T_{ACP} \quad (5.1)$$

$$\mu = \mu_{EA} + \mu_{ACP} \quad (5.2)$$

Figura 5.47. Esquematização de T , T_{EA} e T_{ACP} [293].

Uma análise de maior profundidade deste modelo está fora dos objetivos desta Tese. Mas, as medições das grandezas T_{EA} e T_{ACP} podem vir a auxiliar na determinação do coeficiente de atrito de Coulomb.

Capítulo 6

Conclusões

6.1. Contribuições

Basicamente, há cinco pontos que merecem ser enfatizados neste trabalho:

1. Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa hábil a medir a força tangencial desenvolvida durante os ensaios, além do que, o mesmo apresenta, na esfera de ensaio, excentricidade zero, algo que é considerado impossível para Gee e Wicks [53];
2. Comprovação de que, além da força normal e concentração da pasta abrasiva, a distância de deslizamento apresenta importante influência sobre a transição entre os modos de desgaste abrasivo. Com o aumento de S , há o favorecimento na atuação de desgaste abrasivo por rolamento, devido à diminuição da pressão no sistema tribológico;
3. Além dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento”, foi observada uma condição intermediária, o denominado “micro-rolling abrasion” (“micro-rolamento”, na Língua Portuguesa), que atua ao longo dos riscos deixado pelo desgaste abrasivo por “riscamento” (Figura 6.1d);
4. Realização de ensaios sob condições de “pressão constante”;
5. Cálculo, de forma prática, do coeficiente de atrito desenvolvido no sistema tribológico “esfera / partículas abrasivas / corpo-de-prova”, que se sucedeu pela aquisição direta das forças “normal” e “tangencial”. O mesmo foi determinado sob condições de “força normal constante” e “pressão constante”.

A Figura 6.1 exemplifica as atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento”, além da condição intermediária “micro-rolling abrasion”.

Figura 6.1. Atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento” e da condição intermediária “micro-rolling abrasion”. (a) “Riscamento” (somente visão macroscópica) [12], (b) “rolamento” (somente) [35], (c) “riscamento + rolamento” (modo-misto) [23] e (d) “micro-rolling abrasion” [12].

6.2. Pesquisas Iniciais – Conclusões

Das “Pesquisas Iniciais”, foi concluído que:

1. A severidade de ensaio afetou as ocorrências dos modos de desgaste abrasivo e suas transições. Menores severidades de ensaio, relacionadas a baixas pressões e elevados tempos de ensaio, favorecem a atuação de desgaste abrasivo por rolamento e, elevadas severidades de ensaio, desgaste abrasivo por riscamento;
2. Para o corpo-de-prova de WC-Co, a evolução da severidade de ensaio em função do tempo foi similar para as condições de ensaio definidas para os testes conduzidos nos

equipamentos de configurações “esfera-livre” e “esfera-fixa”. Ainda para este corpo-de-prova, uma tendência similar também foi observada em termos das transições entre os modos de desgaste abrasivo, que ocorreram, aproximadamente, no mesmo tempo de ensaio;

3. Em relação ao corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2, menores severidades de ensaio foram calculadas para os ensaios realizados no equipamento de configuração “esfera-livre”, que foi associada a uma transição antecipada para o desgaste abrasivo por rolamento;
4. As análises de imagens conduzidas por Microscopia Óptica das crateras de desgaste revelaram somente a presença de desgaste abrasivo por riscamento. Entretanto, observações mais detalhadas realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura indicaram que diferentes níveis de desgaste abrasivo por rolamento atuaram ao longo dos riscos, para as condições de “força normal constante” e “pressão constante”. Tal fenômeno foi nomeado de “micro-rolling abrasion” (“micro-rolamento”, na Língua Portuguesa), podendo ser sugerido como uma variante do “modo-misto” de desgaste abrasivo;
5. O nível de atuação de “micro-rolling abrasion” foi inversamente proporcional à “força normal constante” e “pressão constante”;
6. Em geral, ao longo de testes realizados sob as mesmas condições de ensaio, a dispersão dos valores do coeficiente de atrito foi relativamente baixa para os ensaios conduzidos sob as condições de ensaio de “pressão constante”, quando comparado aos experimentos realizados sob “força normal constante”;
7. A dispersão do coeficiente de atrito diminuiu com o aumento do valor da força normal, o que pode estar associado com diferenças na relação entre o número de partículas que rolam e o número de partículas abrasivas que deslizam sobre a superfície da cratera de desgaste.

6.3. Pesquisas Definitivas – Conclusões

Das “Pesquisas Definitivas”, foi concluído que:

1. Em relação ao equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa, por intermédio de um relógio comparador com precisão de $1\text{ }\mu\text{m}$, a excentricidade de sua esfera de ensaio foi totalmente eliminada, o que garantiu que os ensaios fossem realizados de forma precisa e confiável. Isso porque, conforme esquematizou a Figura 5.1, um eventual desalinhamento da esfera pode fazer com que, na maior parte do tempo, a mesma esteja fora do contato com o corpo-de-prova, inserindo erros nas medições das forças normal e tangencial;
2. Estudos realizados por Análise de Variância mostraram que, estatisticamente, sob condições de “força normal constante” ou “pressão constante”, o valor do coeficiente de atrito é independente destas grandezas, para o conjunto de ensaios realizados neste trabalho;
3. Além da “força normal constante” e “pressão constante”, o coeficiente de atrito independeu do tempo de ensaio e da concentração da pasta abrasiva;
4. Foi confirmada a existência de uma variante do modo-misto de desgaste abrasivo, o denominado “micro-rolling abrasion”, que atua entre os riscos deixado pelo desgaste abrasivo por riscamento;
5. A distância entre riscos para as diferentes condições de ensaio foi, aproximadamente, a mesma, e não apresentou qualquer relação com o coeficiente de atrito;
6. A taxa de desgaste não apresentou qualquer relação com o coeficiente de atrito, independente da condição de ensaio ter sido de “força normal constante” ou “pressão constante”.

Referências Bibliográficas

- [1] Wikipédia – A enciclopédia livre.
“<http://pt.wikipedia.org/>”, página acessada em Julho/2009.
- [2] Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa, Folha de São Paulo, 1995.
- [3] The American Heritage Dictionary – Second College Edition, Houghton Mifflin Company, Boston.
- [4] ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.
“<http://www.abmbrasil.com.br/>”, página acessada em Julho-Novembro/2009.
- [5] N. Fillot, I. Iordanoff, Y. Berthier, Wear modeling and the third body concept, *Wear* 262 (2007) 949-957.
- [6] ASTM G 40 – 96
Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.
- [7] F.C. Marcondes, A história do metal duro, 1ª Edição, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda., São Paulo, Brasil, 1990.
- [8] K.L. Rutherford, I.M. Hutchings, Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *Journal of Testing and Evaluation - JTEVA* 25 (2) (1997) 250-260.
- [9] A. Kassman, S. Jacobson, L. Erickson, P. Hedenqvist, M. Olsson, A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings, *Surface and Coatings Technology* 50 (1991) 75-84.
- [10] S. Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson, Design and evaluation of tribological coatings, *Wear* 246 (2000) 20-33.
- [11] M. Fallqvist, M. Olsson, S. Ruppi, Abrasive wear of multilayer κ -Al₂O₃-Ti(C,N) CVD coatings on cemented carbide, *Wear* 263 (2007) 74-80.
- [12] R.C. Cozza, D.K. Tanaka, R.M. Souza, Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results, *Wear* 267 (2009) 61-70.
- [13] K. Adachi, I.M. Hutchings, Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test, *Wear* 255 (2003) 23-29.
- [14] J.C.A. Batista, C. Godoy, A. Matthews, Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings, *Tribology International* 35 (2002) 363-372.
- [15] J.C.A. Batista, M.C. Joseph, C. Godoy, A. Matthews, Micro-abrasion wear testing of PVD TiN coatings on untreated and plasma nitrided AISI H13 steel, *Wear* 249 (2002) 971-979.

- [16] J.C.A. Batista, A. Matthews, C. Godoy, Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings, *Surface and Coatings Technology* 142-144 (2001) 1137-1143.
- [17] J.O. Bello, R.J.K. Wood, Grooving micro-abrasion of polyamide 11 coated carbon steel tubulars for downhole application, *Wear* 255 (2003) 1157-1167.
- [18] J.O. Bello, R.J.K. Wood, Micro-abrasion of filled and unfilled polyamide 11 coatings, *Wear* 258 (2005) 294-302.
- [19] K. Bose, R.J.K. Wood, Optimun tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings, *Wear* 258 (2005) 322-332.
- [20] L. Ceschini, G. Palombarini, G. Sambogna, D. Firrao, G. Scavino, G. Ubertalli, Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests, *Tribology International* 39 (2006) 748-755.
- [21] H. Chen, C. Xu, Q. Zhou, I.M. Hutchings, P.H. Shipway, J. Liu, Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings, *Wear* 258 (2005) 333-338.
- [22] R.C. Cozza, Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo, *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2006, 217 p..
- [23] R.C. Cozza, J.D.B. de Mello, D.K. Tanaka, R.M. Souza, Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests, *Wear* 263 (2007) 111-116.
- [24] R.C. Cozza, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel. In: *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2005*, Ouro Preto – MG, Brasil, 2005.
- [25] R.C. Cozza, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Influência do desgaste da esfera na formação das calotas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa. In: *Anais do IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2006*, Recife – PE, Brasil, 2006.
- [26] R.C. Cozza, L.F.M. de Souza, R.R.F. Zeferino, M.D.M. Neves, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Uma abordagem sobre reprodutibilidade de resultados e fragmentação de partículas abrasivas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. In: *Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2008*, Salvador – BA, Brasil, 2008.
- [27] R.C. Cozza, D.K. Tanaka, R.M. Souza, Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses, *Surface and Coatings Technology* 201 (2006) 4242-4246.
- [28] M.G. Gee, A.J. Gant, I.M. Hutchings, Y. Kusano, K. Schiffmann, K. Van Acker, S. Poulat, Y. Gachon, J. von Stebut, P. Hatto, G. Plint, Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test, *Wear* 259 (2005) 27-35.

- [29] Y. Kusano, I.M. Hutchings, Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test, *Wear* 258 (2005) 313-317.
- [30] Y. Kusano, K. Van Acker, I.M. Hutchings, Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates, *Surface and Coatings Technology* 183 (2004) 312-327.
- [31] Y.J. Mergler, A.J. Huis in 't Veld, Micro-abrasive wear of semi-crystalline polymers, *Tribology and Interface Engineering Series* 41 (2003) 165-173. *Tribological Research and Design for Engineering Systems – Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Bodington Hall, University of Leeds, UK.
- [32] A. Ramalho, Micro-scale abrasive wear of coated surfaces-prediction models, *Surface and Coatings Technology* 197 (2005) 358-366.
- [33] K.L. Rutherford, I.M. Hutchings, A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, *Surface and Coatings Technology* 79 (1996) 231-239.
- [34] P.H. Shipway, L. Howell, Microscale abrasion-corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings, *Wear* 258 (2005) 303-312.
- [35] R.I. Trezona, D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test, *Wear* 225-229 (1999) 205-214.
- [36] R.R.F. Zeferino, R.C. Cozza, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Efeito da pressão de contato em ensaios de micro-abrasão de WC-Co P20. In: *VIII Encontro de Iniciação Científica do Laboratório de Fenômenos de Superfícies*, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2007.
- [37] R.R.F. Zeferino, R.C. Cozza, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Análise de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos sob força normal e pressão de contato constantes. In: *Anais do XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – CREEM 2007*, Uberlândia – MG, Brasil, 2007.
- [38] R.R.F. Zeferino, R.C. Cozza, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Effect of the contact pressure on the wear mode transition in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20. In: *Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2007*, Brasília – DF, Brazil, 2007.
- [39] D.N. Allsopp, R.I. Trezona, I.M. Hutchings, The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test, *Tribology Letters* 5 (1998) 259-264.
- [40] A. Dorner, C. Schürer, G. Reisel, G. Irmer, O. Seidel, E. Müller, Diamond-like carbon-coated Ti6Al4V: influence of the coating thickness on the structure and the abrasive wear resistance, *Wear* 249 (2001) 489-497.
- [41] D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperatures, *Wear* 251 (2001) 1308-1314.

- [42] J. Cawley, J.E.P. Metcalf, A.H. Jones, T.J. Band, D.S. Skupien, A tribological study of cobalt chromium molybdenum alloys used in metal-on-metal resurfacing hip arthroplasty, *Wear* 255 (2003) 999-1006.
- [43] M.G. Gee, A.J. Gant, I.M. Hutchings, R. Bethke, K. Schiffman, K. Van Acker, S. Poulat, Y. Gachon, J. von Stebut, Progress towards standardisation of ball cratering, *Wear* 255 (2003) 1-13.
- [44] S. Cardoso Santos, W.F. Sales, F.J. Silva, S.D. Franco, M.B. Silva, Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools, *Surface and Coatings Technology* 184 (2004) 141-148.
- [45] W.M. da Silva, Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na micro-abrasão do ferro sinterizado a vapor, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil, 2003, 98 p..
- [46] W.M. da Silva, R. Binder, J.D.B. de Mello, Abrasive wear of steam-treated sintered iron, *Wear* 258 (2005) 166-177.
- [47] W.M. da Silva, R. Binder, J.D.B. de Mello, Microabrasão do ferro sinterizado e oxidado a vapor: mecanismos de desgaste, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.2, n.2, p. 39-44, out.-dez. 2005.
- [48] G.W. Stachowiak, Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear, *Wear* 241 (2000) 214-219.
- [49] G.B. Stachowiak, G.W. Stachowiak, Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles, *Wear* 256 (2004) 600-607.
- [50] K. Adachi, I.M. Hutchings, Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness, *Wear* 258 (2005) 318-321.
- [51] R.C. Cozza, Técnicas de aplicação e medição das forças normal e tangencial em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, Monografia, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2006, 34 p..
- [52] R.C. Cozza, Adoção de técnicas de difração e imagem na caracterização de materiais e análise de resultados obtidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, Monografia, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2007, 99 p..
- [53] M.G. Gee, M.J. Wicks, Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings, *Surface and Coatings Technology* 133-134 (2000) 376-382.
- [54] C. Martini, G. Palombarini, G. Poli, D. Prandstraller, Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, *Wear* 256 (2004) 608-613.
- [55] M.T. Mathew, M.M. Stack, B. Matijevic, L.A. Rocha, E. Ariza, Micro-abrasion resistance of thermochemically treated steels in aqueous solutions: Mechanisms, maps, materials selection, *Tribology International* 41 (2008) 141-149.

- [56] P.H. Shipway, C.J.B. Hodge, Microabrasion of glass – the critical role of ridge formation, *Wear* 237 (2000) 90-97.
- [57] P.H. Shipway, J.J. Hogg, Dependence of microscale abrasion mechanisms of WC-Co hardmetals on abrasive type, *Wear* 259 (2005) 44-51.
- [58] M.M. Stack, H. Jawan, M.T. Mathew, On the construction of micro-abrasion maps for a steel/polymer couple in corrosive environments, *Tribology International* 38 (2005) 848-856.
- [59] M.M. Stack, M.T. Mathew, Micro-abrasion transitions of metallic materials, *Wear* 255 (2003) 14-22.
- [60] M.M. Stack, M.T. Mathew, Mapping the micro-abrasion resistance of WC/Co based coatings in aqueous conditions, *Surface and Coatings Technology* 183 (2004) 337-346.
- [61] R.I. Trezona, I.M. Hutchings, Three-body abrasive wear testing of soft materials, *Wear* 233-235 (1999) 209-221.
- [62] P. Vale Antunes, A. Ramalho, Study of abrasive resistance of composites for dental restoration by ball-cratering, *Wear* 255 (2003) 990-998.
- [63] M.J. Ibáñez, J. Gilabert, M. Vicent, P. Gómez, D. Muñoz, Determination of the wear resistance of traditional ceramic materials by means of micro-abrasion technique, *Wear* 267 (2009) 2048-2054.
- [64] D.A. Kelly, I.M. Hutchings, A new method for measurement of particle abrasivity, *Wear* 250 (2001) 76-80.
- [65] M.G. Gee, The use of PC scanners in micro-abrasion wear testing, *Wear* 259 (2005) 1448-1452.
- [66] I.M. Hutchings, Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach, *Tribology International* 31 (1-3) (1998) 5-15.
- [67] I.M. Hutchings, Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach, *Tribology International* 31 (1-3) (1998) 5-15.
- [68] A.M. Baptista, J. Ferreira, N. Pinto, Ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa. In: *Anais da 7ª Jornada Portuguesa de Tribologia*, Porto, Portugal, 2000.
- [69] R.C. Cozza, A.A.C. Recco, A.P. Tschiptschin, R.M. Souza, D.K. Tanaka, A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. In: *Proceedings of the 64th ABM Congress*, Belo Horizonte – MG, Brazil, 2009.
- [70] ASTM G 77 – 91
Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.

- [71] ASM Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International – The Materials Information Society, 1998.
- [72] C.B. Coutinho, Materiais metálicos para engenharia, 1^a. Edição, Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte – MG, Brasil, 1992.
- [73] M. Ohring, Engineering materials science, Academic Press – A Division of Harcourt Brace & Company, San Diego – California, USA, 1995.
- [74] T.Z. Kattamis, M. Chen, S. Skolianos, B.V. Chambers, Effect of residual stresses on the strength, adhesion and wear resistance of SiC coatings obtained by plasma-enhanced chemical vapor deposition on low alloy steel, Surface and Coatings Technology 70 (1994) 43-48.
- [75] I.M. Hutchings, Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials, 7th Edition, Edward Arnold, a division of Hodder Headline PLC, London, UK, 1992.
- [76] J.C.A. Batista, C. Godoy, G. Pintaúde, A. Sinatora, A. Matthews, An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests, Surface and Coatings Technology 174-175 (2003) 891-898.
- [77] A.J. Gant, M.G. Gee, A.T. May, Microabrasion of WC-Co hardmetals in corrosive media, Wear 256 (2004) 954-962.
- [78] M.G. Gee, A.J. Gant, I.M. Hutchings, Y. Kusano, K. Schiffmann, K. Van Acker, S. Poulat, Y. Gachon, J von Stebut, P. Hatto, G. Plint, Crater: Interlaboratory Exercise – Description, Procedure and Results, National Physical Laboratory, United Kingdom, NPL Report MATC(A)168, April 2004.
- [79] V. Imbeni, C. Martini, E. Lanzoni, G. Poli, I.M. Hutchings, Tribological behaviour of multi-layered PVD nitride coatings, Wear 251 (2001) 997-1002.
- [80] V. Imbeni, C. Martini, D. Prandstraller, G. Poli, C. Trepanier, T.W. Duerig, Preliminary study of micro-scale abrasive wear of a NiTi shape memory alloy, Wear 254 (2003) 1299-1306.
- [81] G. de Portu, L. Micele, D. Prandstraller, G. Palombarini, G. Pezzotti, Abrasive wear in ceramic laminated composites, Wear 260 (2006) 1104-1111.
- [82] G. Quercia, I. Grigorescu, H. Contreras, C. Di Rauso, D. Gutiérrez-Campos, Friction and wear behavior of several hard materials, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 19 (2001) 359-369.
- [83] K.L. Rutherford, S.J. Bull, E.D. Doyle, I.M. Hutchings, Laboratory characterisation of the wear behaviour of PVD-coated tool steels and correlation with cutting tool performance, Surface and Coatings Technology 80 (1996) 176-180.

- [84] K.L. Rutherford, P.W. Hatto, C. Davies, I.M. Hutchings, Abrasive wear resistance of TiN/NbN multi-layers: measurement and neural network modelling, *Surface and Coatings Technology* 86-87 (1996) 472-479.
- [85] P.E. Sinnett-Jones, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, Micro-abrasion–corrosion of a CoCrMo alloy in simulated artificial hip joint environments, *Wear* 259 (2005) 898-909.
- [86] D. Sun, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, L. Ma, W.M. Rainforth, Microabrasion–corrosion of cast CoCrMo alloy in simulated body fluids, *Tribology International* 42 (2009) 99-110.
- [87] M.R. Thakare, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, C. Menger, Exposure effects of alkaline drilling fluid on the microscale abrasion-corrosion of WC-based hardmetals, *Wear* 263 (2007) 125-136.
- [88] M.R. Thakare, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, C. Menger, Exposure effects of strong alkaline conditions on the microscale abrasion-corrosion of D-gun sprayed WC-10Co-4Cr coating, *Tribology International* 41 (2008) 629-639.
- [89] R.I. Trezona, I.M. Hutchings, Resistance of paint coatings to multiple solid particle impact: effect of coating thickness and substrate material, *Progress in Organic Coatings* 41 (2001) 85-92.
- [90] A.J. Gant, M.G. Gee, A.T. May, The evaluation of tribo-corrosion synergy for WC-Co hardmetals in low stress abrasion, *Wear* 256 (2004) 500-516.
- [91] A.J. Gant, M.G. Gee, B. Roebuck, Rotating wheel abrasion of WC/Co hardmetals, *Wear* 258 (2005) 178-188.
- [92] M.G. Gee, A.J. Gant, B. Roebuck, Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals, *Wear* 263 (2007) 137-148.
- [93] L.V. Ramos, Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2005, 82 p..
- [94] M. Scholl, Abrasive wear of titanium nitride coatings, *Wear* 203-204 (1997) 57-64.
- [95] K. Van Acker, D. Vanhoyweghen, R. Persoons, J. Vangrunderbeek, Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings, *Wear* 258 (2005) 194-202.
- [96] F.G. Bernardes, Desgaste abrasivo de um ferro fundido branco multi-componente, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2005, 93 p..
- [97] M.M. Santos, Estudo da influência de lubrificante nos regimes de desgaste abrasivo (moderado e severo) de aços e ferros fundidos, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2005, 73 p..

- [98] T. Sasada, M. Oike, N. Emori, The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear, *Wear* 97 (1984) 291-302.
- [99] M.T. Siniawski, S.J. Harris, Q. Wang, A universal wear law for abrasion, *Wear* 262 (2007) 883-888.
- [100] N. Axén, S. Jacobson, S. Hogmark, Influence of hardness of the counterbody in three-body abrasive wear – an overlooked hardness effect, *Tribology International* 27 (4) (1994) 233-241.
- [101] J.T. Burwell, Jr., Survey of possible wear mechanisms, *Wear* 1 (1957/58) 119-141.
- [102] I.M. Hutchings, Mechanisms of wear in powder technology: a review, *Powder Technology* 76 (1993) 3-13.
- [103] T. Wong, W. Kim, P. Kwon, Experimental support for a model-based prediction of tool wear, *Wear* 257 (2004) 790-798.
- [104] M.A. Moore, A review of two-body abrasive wear, *Wear* 27 (1974) 1-17.
- [105] E. Rabinowicz, L.A. Dunn, P.G. Russell, A study of abrasive wear under three-body conditions, *Wear* 4 (1961) 345-355.
- [106] I.M. Hutchings, Abrasion processes in wear and manufacturing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 216 (2002) 55-62.
- [107] J.D. Gates, Two-body and three-body abrasion: A critical discussion, *Wear* 214 (1998) 139-146.
- [108] A. Misra, I. Finnie, A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester, *Wear* 60 (1980) 111-121.
- [109] C. Spero, D.J. Hargreaves, R.K. Kirkcaldie, H.J. Flitt, Review of test methods for abrasive wear in ore grinding, *Wear* 146 (1991) 389-408.
- [110] Saint-Gobain Abrasivos.
“<http://www.saint-gobain.com.br/>”, página acessada em Fevereiro/2008.
- [111] A.A.C. Recco, Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços ferramentas AISI H13 e D2 nitretados e não nitretados, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2008, 164 p..
- [112] Norma DIN 804 – Edição: Março/1977.
- [113] A.R. Franco Júnior, C.E. Pinedo, A.P. Tschiptschin, Effect of the microstructure and thickness of nitrided cases on the abrasive wear resistance of duplex layered PVD-TiN coatings. In: *Proceedings of the XVIII International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2005*, Ouro Preto – MG, Brasil, 2005.

- [114] A. Ramalho, prediction models of micro-scale abrasion of thin coated surfaces, In: Proceedings of the XVIII International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2005, Ouro Preto – MG, Brasil, 2005.
- [115] C.P. Dogan, J.A. Hawk, Microstructure and abrasive wear in silicon nitride ceramics, *Wear* 250 (2001) 256-263.
- [116] L.C. Erickson, H.M. Hawthorne, T. Troczynski, Correlations between microstructural parameters, micromechanical properties and wear resistance of plasma sprayed ceramic coatings, *Wear* 250 (2001) 569-575.
- [117] A.J. Gant, M.G. Gee, Wear of tungsten carbide-cobalt hardmetals and hot isostatically pressed high speed steels under dry abrasive conditions, *Wear* 251 (2001) 908-915.
- [118] M.M. Khrushchov, Principles of abrasive wear, *Wear* 28 (1974) 69-88.
- [119] K. Kato, Wear in relation to friction – a review, *Wear* 241 (2000) 151-157.
- [120] G.K. Nathan, W.J.D. Jones, The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions, *Wear* 9 (1966) 300-309.
- [121] J. Richter, Micro-scale abrasion testing of PVD TiN coatings on conventional and nonledeburitic high-speed steels, *Wear* 257 (2004) 304-310.
- [122] J.F. Archard, Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of Applied Physics* 24 (8) (August 1953) 981-988.
- [123] N. Chand, U.K. Dwivedi, Effect of coupling agent on abrasive wear behaviour of chopped jute fibre-reinforced polypropylene composites, *Wear* 261 (2006) 1057-1063.
- [124] F.J.G. Silva, A.J.S. Fernandes, F.M. Costa, V. Teixeira, A.P.M. Baptista, E. Pereira, Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates, *Wear* 255 (2003) 846-853.
- [125] S. Wilson, H.M. Hawthorne, Q. Yang, T. Troczynski, Scale effects in abrasive wear of composite sol-gel alumina coated light alloys, *Wear* 251 (2001) 1042-1050.
- [126] M. Choudhury, I.M. Hutchings, The effects of irradiation and ageing on the abrasive wear resistance of ultra high molecular weight polyethylene, *Wear* 203-204 (1997) 335-340.
- [127] V. Imbeni, I.M. Hutchings, M.C. Breslin, Abrasive wear behaviour of an Al₂O₃-Al co-continuous composite, *Wear* 233-235 (1999) 462-467.
- [128] K.L. Rutherford, R.I. Trezona, A.C. Ramamurthy, I.M. Hutchings, The abrasive and erosive wear of polymeric paint films, *Wear* 203-204 (1997) 325-334.
- [129] K. Van Acker, K. Vercammen, Abrasive wear by TiO₂ particles on hard and on low friction coatings, *Wear* 256 (2004) 353-361.

- [130] K. Bose, R.J.K. Wood, Influence of load and speed on rolling micro-abrasion of CVD diamond and other hard coatings, *Diamond and Related Materials* 12 (2003) 753-756.
- [131] D.N. Allsopp, Abrasive wear of bulk materials and hard coatings, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 1999.
- [132] R. Bethke, K. Schiffmann, Ball cratering wear test: review of the state of the art, Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik, Braunschweig, May 2001.
- [133] J.K. Lancaster, The formation of surface films at the transition between mild and severe metallic wear, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Volume 273, Issue 1355, pp. 466-483 (1963).
- [134] J.O. Bello, R.J.K. Wood, J.A. Wharton, Synergistic effects of micro-abrasion-corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels, *Wear* 263 (2007) 149-159.
- [135] K.I. Schiffmann, R. Bethke, N. Kristen, Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates, *Surface and Coatings Technology* 200 (2005) 2348-2357.
- [136] ASTM G 105 – 89
Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests.
- [137] V. Balasubramanian, R. Varahamoorthy, C.S. Ramachandran, S. Babu, Abrasive slurry wear behavior of stainless steel surface produced by plasma transferred arc hardfacing process, *Surface and Coatings Technology* 202 (2008) 3903-3912.
- [138] G. Pintaúde, Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2002, 200 p..
- [139] K.-H. Zum Gahr, Microstructure and wear of materials, *Tribology Series*, 10 – Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands, 1987.
- [140] D.V. De Pellegrin, G.W. Stachowiak, Evaluating the role of particle distribution and shape in two-body abrasion by statistical simulation, *Tribology International* 37 (2004) 255-270.
- [141] D.V. De Pellegrin, G.W. Stachowiak, Simulation of three-dimensional abrasive particles, *Wear* 258 (2005) 208-216.
- [142] M.F.C. Andrade, R.P. Martinho, F.J.G. Silva, R.J.D. Alexandre, A.P.M. Baptista, Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings, *Wear* 267 (2009) 12-18.
- [143] J.J. Coronado, A. Sinatora, Particle size effect on abrasion resistance of mottled cast iron with different retained austenite contents, *Wear* 267 (2009) 2077-2082.

- [144] J. Larsen-Badse, Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion, *Wear* 12 (1968) 35-53.
- [145] E. Rabinowicz, A. Mutis, Effect of abrasive particle size on wear, *Wear* 8 (1965) 381-390.
- [146] H. Sin, N. Saka, N.P. Suh, Abrasive wear mechanisms and the grit size effect, *Wear* 55 (1979) 163-190.
- [147] D. Sun, J.A. Wharton, R.J.K.Wood, Micro-abrasion–corrosion of cast CoCrMo – Effects of micron and sub-micron sized abrasives, *Wear* 267 (2009) 52-60.
- [148] R. Gahlin, S. Jacobson, The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces, *Wear* 224 (1999) 118-125.
- [149] M.G. Hamblin, G.W. Stachowiak, A multi-scale measure of particle abrasivity, *Wear* 185 (1995) 225-233.
- [150] M.G. Hamblin, G.W. Stachowiak, A multi-scale measure of particle abrasivity, and its relation to two-body abrasive wear, *Wear* 190 (1995) 190-196.
- [151] D.V. De Pellegrin, G.W. Stachowiak, Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using ‘sharpness analysis’. Part I. Technique development, *Wear* 253 (2002) 1016-1025.
- [152] D.V. De Pellegrin, G.W. Stachowiak, Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using ‘sharpness analysis’. Part II. Technique evaluation, *Wear* 253 (2002) 1026-1034.
- [153] G.B. Stachowiak, G.W. Stachowiak, The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear, *Wear* 249 (2001) 201-207.
- [154] K. Gotoh, J.L. Finney, Representation of the size and shape of a single particle, *Powder Technology* 12 (1975) 125-130.
- [155] E. Badisch, C. Mitterer, Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance, *Tribology International* 36 (2003) 765-770.
- [156] P.H. Shipway, J.J. Hogg, Wear of bulk ceramics in micro-scale abrasion – The role of abrasive shape and hardness and its relevance to testing of ceramic coatings, *Wear* 263 (2007) 887-895.
- [157] D. Sun, J.A. Wharton, R.J.K.Wood, Micro-abrasion mechanisms of cast CoCrMo in simulated body fluids, *Wear* 267 (2009) 1845-1855.
- [158] R.C. Cozza, A.A.C. Recco, A.P. Tschiptschin, R.M. Souza, D.K. Tanaka, Análise comportamental dos coeficientes de atrito e desgaste de sistemas revestidos submetidos a desgaste micro-abrasivo, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 6, n. 4, p. 237-244, abr.-jun. 2010.

- [159] P.H. Shipway, The role of test conditions on the microabrasive wear behaviour of soda-lime glass, *Wear* 233-235 (1999) 191-199.
- [160] P.H. Shipway, N.K. Ngao, Microscale abrasive wear of polymeric materials, *Wear* 255 (2003) 742-750.
- [161] A.H. Jones, Micro-scale abrasive wear of silicon nitride, sialon-TiB₂ composites and D2 tool steel using a multiple load method, *Wear* 258 (2005) 942-952.
- [162] F.J. Buchanan, P.H. Shipway, Microabrasion – a simple method to assess surface degradation of UHMWPE following sterilisation and ageing, *Biomaterials* 23 (2002) 93-100.
- [163] K. Holmberg, A. Matthews, H. Ronkainen, Coatings tribology – contact mechanisms and surface design, *Tribology International* 31 (1-3) (1998) 107-120.
- [164] M.A. Moore, A preliminary investigation of frictional heating during abrasive wear, *Wear* 17 (1971) 51-58.
- [165] T.J. Harvey, R.J.K. Wood, G. Denuault, H.E.G. Powrie, Investigation of electrostatic charging mechanisms in oil lubricated tribo-contacts, *Tribology International* 35 (2002) 605-614.
- [166] O.D. Tasbaz, R.J.K. Wood, M. Browne, H.E.G. Powrie, G. Denuault, Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing, *Wear* 230 (1999) 86-97.
- [167] L. Wang, R.J.K. Wood, The influence of contact conditions on surface reaction layers formed between steel surfaces lubricated by an aviation oil, *Tribology International* 40 (2007) 1655-1666.
- [168] J.A. Williams, A.M. Hyncica, Abrasive wear in lubricated contacts, *Journal of Physics D: Applied Physics* 25 (1992) A81-A90.
- [169] J.A. Williams, A.M. Hyncica, Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts, *Wear* 152 (1992) 57-74.
- [170] E. Oberg, F.D. Jones, H.L. Horton, H.H. Ryffel, *Machinery's Handbook*, 26th Edition, Industrial Press Inc., New York, 2000.
- [171] W.D. Callister, Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5^a. Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2002.
- [172] M. Barge, J. Rech, H. Hamdi, J.M. Bergheau, Experimental study of abrasive process, *Wear* 264 (2008) 382-388.
- [173] A. Azarkhin, O. Richmond, A model of ploughing by a pyramidal indenter – upper bound method for stress-free surfaces, *Wear* 157 (1992) 409-418.

- [174] J.M. Challen, P.L.B. Oxley, An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models, *Wear* 53 (1979) 229-243.
- [175] K. Kato, Micro-mechanisms of wear – wear modes, *Wear* 153 (1992) 277-295.
- [176] W.M. Garrison, Jr., Abrasive wear resistance: the effects of ploughing and the removal of ploughed material, *Wear* 114 (1987) 239-247.
- [177] J. Jiang, F. Sheng, F. Ren, Modelling of two-body abrasive wear under multiple contact conditions, *Wear* 217 (1998) 35-45.
- [178] T.O. Mulhearn, L.E. Samuels, The abrasion of metals: a model of the process, *Wear* 5 (1962) 478-498.
- [179] A.G. Wang, I.M. Hutchings, Mechanisms of abrasive wear in a boronized alloy steel, *Wear* 124 (1988) 149-163.
- [180] J.A. Williams, Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach, *Wear* 225-229 (1999) 1-17.
- [181] Z. Bo, X. You-Bai, Two-body microcutting wear model. Part I: Two-dimensional roughness model, *Wear* 129 (1989) 37-48.
- [182] Z. Bo, X. You-Bai, Two-body microcutting wear model. Part II: Three-dimensional roughness model, *Wear* 129 (1989) 49-58.
- [183] Z. Bo, X. You-Bai, Two-body microcutting wear model. Part III: Stable profile height distribution of a worn surface, *Wear* 129 (1989) 59-66.
- [184] Z. Bo, X. You-Bai, Two-body microcutting wear model. Part IV: Theoretical analysis of friction, *Wear* 129 (1989) 67-79.
- [185] M.A. Masen, M.B. de Rooij, D.J. Schipper, Micro-contact based modelling of abrasive wear, *Wear* 258 (2005) 339-348.
- [186] R. Colaço, R. Vilar, Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials, *Wear* 255 (2003) 643-650.
- [187] G.J. Gore, J.D. Gates, Effect of hardness on three very different forms of wear, *Wear* 203-204 (1997) 544-563.
- [188] S. Wirojanupatump, P.H. Shipway, A direct comparison of wet and dry abrasion behaviour of mild steel, *Wear* 233-235 (1999) 655-665.
- [189] T. Kayaba, K. Hokkirigawa, K. Kato, Analysis of the abrasive wear mechanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope, *Wear* 110 (1986) 419-430.
- [190] T. Hisakado, T. Tanaka, H. Suda, Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from plowing volume in abrasive wear, *Wear* 236 (1999) 24-33.

- [191] L. Fang, J. Xing, W. Liu, Q. Xue, G. Wu, X. Zhang, Computer simulation of two-body abrasion processes, *Wear* 251 (2001) 1356-1360.
- [192] K. Kato, Abrasive wear of metals, *Tribology International* 30 (5) (1997) 333-338.
- [193] L. Fang, W. Liu, D. Du, X. Zhang, Q. Xue, Predicting three-body abrasive wear using Monte Carlo methods, *Wear* 256 (2004) 685-694.
- [194] J.D. Bressan, J.A. Williams, Mathematical slip-line field solutions for ploughing a hard particle over a softer material, *Wear* 267 (2009) 1865-1872.
- [195] A. Arora, D.B. Marshall, B.R. Lawn, M.V. Swain, Indentation deformation/fracture of normal and anomalous glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids* 31 (1979) 415-428.
- [196] M.V. Swain, B.R. Lawn, Indentation fracture in brittle rocks and glasses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13 (11) (1976) 311-319.
- [197] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física. 1 – Mecânica*, 4ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1996.
- [198] D. Dowson, *History of Tribology*, 1st Edition, Longman Group Limited, London, UK, 1979.
- [199] A. Sinatora, D.K. Tanaka, Leis do atrito: da Vinci, Amontons ou Coulomb?, *ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Revista ABCM Engenharia, Volume XII, Número 1, Outubro/2007.
- [200] K. Adachi, K. Kato, N. Chen, Wear map of ceramics, *Wear* 203-204 (1997) 291-301.
- [201] E. Badisch, G.A. Fontalvo, C. Mitterer, The response of PACVD TiN coatings to tribological tests with different counterparts, *Wear* 256 (2004) 95-99.
- [202] S. Bahadur, C.N. Yang, Friction and wear behavior of tungsten and titanium carbide coatings, *Wear* 196 (1996) 156-163.
- [203] M. Benkahoul, P. Robin, L. Martinu, J.E. Klemberg-Sapieha, Tribological properties of duplex Cr-Si-N coatings on SS410 steel, *Surface and Coatings Technology* 203 (2009) 934-940.
- [204] J.E. Booth, K.D. Nelson, T.J. Harvey, R.J.K. Wood, L. Wang, H.E.G. Powrie, J.G. Martinez, The feasibility of using electrostatic monitoring to identify diesel lubricant additives and soot contamination interactions by factorial analysis, *Tribology International* 39 (2006) 1564-1575.
- [205] N.P. Brandon, R.J.K. Wood, The influence of interfacial potential on friction and wear in an aqueous drilling mud, *Wear* 170 (1993) 33-38.
- [206] L.D. Chambers, K.R. Stokes, F.C. Walsh, R.J.K. Wood, Modern approaches to marine antifouling coatings, *Surface and Coatings Technology* 201 (2006) 3642-3652.

- [207] F. Clarysse, W. Lauwerens, M. Vermeulen, Tribological properties of PVD tool coatings in forming operations of steel sheet, *Wear* 264 (2008) 400-404.
- [208] J.M. Cox, M.G. Gee, Hot friction testing of ceramics, *Wear* 203-204 (1997) 404-417.
- [209] P.R. Dufour, A.W.J. Gee, J.A. Kingma, J.W.M. Mens, The effect of glassfibre, graphite and MoS₂ on the tribological performance of a liquid crystalline polymer, *Wear* 156 (1992) 85-100.
- [210] N. Fateh, G.A. Fontalvo, G. Gassner, C. Mitterer, Influence of high-temperature oxide formation on the tribological behaviour of TiN and VN coatings, *Wear* 262 (2007) 1152-1158.
- [211] W. Feng, D. Yan, J. He, X. Li, Y. Dong, Reactive plasma sprayed TiN coating and its tribological properties, *Wear* 258 (2005) 806-811.
- [212] M.G. Gee, Low load multiple scratch tests of ceramics and hard metals, *Wear* 250 (2001) 264-281.
- [213] M.G. Gee, C.S. Matharu, E.A. Almond, T.S. Eyre, The measurement of sliding friction and wear of ceramics at high temperature, *Wear* 138 (1990) 169-187.
- [214] M.G. Gee, P. Tomlins, A. Calver, R.H. Darling, M. Rides, A new friction measurement system for the frictional component of touch, *Wear* 259 (2005) 1437-1442.
- [215] A.M. Homola, J.N. Israelachvili, P.M. McGuiggan, M.L. Gee, Fundamental experimental studies in tribology: the transition from “interfacial” friction of undamaged molecularly smooth surfaces to “normal” friction with wear, *Wear* 136 (1990) 65-83.
- [216] I. Iliuc, Wear and micropitting of steel ball sliding against TiN coated steel plate in dry and lubricated conditions, *Tribology International* 39 (2006) 607-615.
- [217] D. Jianxin, L. Jianhua, Z. Jinlong, S. Wenlong, N. Ming, Friction and wear behaviors of the PVD ZrN coated carbide in sliding wear tests and in machining processes, *Wear* 264 (2008) 298-307.
- [218] V.C. Kumar, I.M. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, *Tribology International* 37 (2004) 833-840.
- [219] Y. Kusano, J.E. Evetts, I.M. Hutchings, Deposition of boron carbon nitride films by dual cathode magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 343-344 (1999) 250-253.
- [220] Y. Kusano, J.E. Evetts, R.E. Somekh, I.M. Hutchings, Properties of carbon nitride films deposited by magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 332 (1998) 56-61.
- [221] S.Y. Lee, B. Kim, S.D. Kim, G. Kim, Y.S. Hong, Effect of Si doping on the wear properties of CrN coatings synthesized by unbalanced magnetron sputtering, *Thin Solid Films* 506-507 (2006) 192-196.

- [222] K.Y. Li, Z.F. Zhou, I. Bello, C.S. Lee, S.T. Lee, Study of tribological performance of ECR-CVD diamond-like carbon coatings on steel substrates. Part 1: The effect of processing parameters and operating conditions, *Wear* 258 (2005) 1577-1588.
- [223] C.S. Liu, Z.Y. Zheng, D.W. Wu, M.S. Ye, P. Gao, Y.G. Peng, X.J. Fan, Sliding friction and wear properties of CN_x/TiN composite films, *Tribology International* 37 (2004) 721-725.
- [224] A. Mandal, M. Chakraborty, B.S. Murty, Effect of TiB_2 particles on sliding wear behaviour of Al-4Cu alloy, *Wear* 262 (2007) 160-166.
- [225] J.W.M. Mens, A.W.J. de Gee, Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water, *Wear* 149 (1991) 255-268.
- [226] A. Mimaroglu, H. Unal, T. Arda, Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced poly-ether-imide on polymer and steel counterface materials, *Wear* 262 (2007) 1407-1413.
- [227] S. Morris, R.J.K. Wood, T.J. Harvey, H.E.G. Powrie, Electrostatic charge monitoring of unlubricated sliding wear of a bearing steel, *Wear* 255 (2003) 430-443.
- [228] A. Neville, V. Kollia-Rafailidi, A comparison of boundary wear film formation on steel and a thermal sprayed Co/Cr/Mo coating under sliding conditions, *Wear* 252 (2002) 227-239.
- [229] J.H. Ouyang, S. Sasaki, The friction and wear characteristics of cathodic arc ion-plated (V, Ti)N coatings in sliding against alumina ball, *Wear* 257 (2004) 708-720.
- [230] M. Pellizzari, D. Cescato, M.G. De Flora, Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls, *Wear* 267 (2009) 467-475.
- [231] B. Podgornik, S. Hogmark, O. Sandberg, Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel, *Wear* 261 (2006) 15-21.
- [232] T. Polcar, R. Novák, P. Siroký, The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures, *Wear* 260 (2006) 40-49.
- [233] U. Sen, Friction and wear properties of thermo-reactive diffusion coatings against titanium nitride coated steels, *Materials and Design* 26 (2005) 167-174.
- [234] L. Settineri, M.G. Faga, Laboratory tests for performance evaluation of nanocomposite coatings for cutting tools, *Wear* 260 (2006) 326-332.
- [235] K. Singh, P.K. Limaye, N.L. Soni, A.K. Grover, R.G. Agrawal, A.K. Suri, Wear studies of (Ti-Al)N coatings deposited by reactive magnetron sputtering, *Wear* 258 (2005) 1813-1824.
- [236] D. Srinivasan, T.G. Kulkarni, K. Anand, Thermal stability and high-temperature wear of Ti-TiN and TiN-CrN nanomultilayer coatings under self-mated conditions, *Tribology International* 40 (2007) 266-277.

- [237] M.H. Staia, D.G. Bhat, E.S. Puchi-Cabrera, J. Bost, Characterization of chemical vapor deposited HfN multilayer coatings on cemented carbide cutting tools, *Wear* 261 (2006) 540-548.
- [238] J. Stallard, D. Mercks, M. Jarratt, D.G. Teer, P.H. Shipway, A study of the tribological behaviour of three carbon-based coatings, tested in air, water and oil environments at high loads, *Surface and Coatings Technology* 177-178 (2004) 545-551.
- [239] P. Stempflé, M. Brendlé, Tribological behaviour of nacre – Influence of the environment on the elementary wear processes, *Tribology International* 39 (2006) 1485-1496.
- [240] F.H. Stott, G.C. Wood, The influence of oxides on the friction and wear of alloys, *Tribology International* (August 1978) 211-218.
- [241] J. Sun, R.J.K. Wood, L. Wang, I. Care, H.E.G. Powrie, Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques, *Wear* 259 (2005) 1482-1489.
- [242] A.A. Voevodin, J.S. Zabinski, C. Muratore, Recent advances in hard, tough, and low friction nanocomposite coatings, *Tsinghua Science and Technology* 10 (6) (2005) 665-679.
- [243] Y. Xia, S. Sasaki, T. Murakami, M. Nakano, L. Shi, H. Wang, Ionic liquid lubrication of electrodeposited nickel-Si₃N₄ composite coatings, *Wear* 262 (2007) 765-771.
- [244] Y. Yan, A. Neville, D. Dowson, Tribo-corrosion properties of cobalt-based medical implant alloys in simulated biological environments, *Wear* 263 (2007) 1105-1111.
- [245] T. Wakabayashi, J.A. Williams, I.M. Hutchings, The action of gaseous lubricants in the orthogonal machining of an aluminium alloy by titanium nitride coated tools, *Surface and Coatings Technology* 57 (1993) 183-189.
- [246] L. Wang, R.J.K. Wood, T.J. Harvey, S. Morris, H.E.G. Powrie, I. Care, Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearings steels, *Wear* 255 (2003) 657-668.
- [247] U. Wiklund, I.M. Hutchings, Investigation of surface treatments for galling protection of titanium alloys, *Wear* 251 (2001) 1034-1041.
- [248] K.-H. Zum Gahr, J. Schneider, Surface modification of ceramics for improved tribological properties, *Ceramics International* 26 (2000) 363-370.
- [249] S. Dhanasekaran, R. Gnanamoorthy, Abrasive wear behavior of sintered steels prepared with MoS₂ addition, *Wear* 262 (2007) 617-623.
- [250] N.B. Dube, I.M. Hutchings, Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel, *Wear* 233-235 (1999) 246-256.
- [251] A.P. Mercer, I.M. Hutchings, The influence of atmospheric humidity on the abrasive wear of metals, *Wear* 103 (1985) 205-215.

- [252] A.P. Mercer, I.M. Hutchings, The influence of atmospheric composition on the abrasive wear of titanium and Ti-6Al-4V, *Wear* 124 (1988) 165-176.
- [253] A.P. Mercer, I.M. Hutchings, The deterioration of bonded abrasive papers during the wear of metals, *Wear* 132 (1989) 77-97.
- [254] A.P. Mouritz, I.M. Hutchings, Abrasive wear of steels against silica-filled epoxy resins under combined rolling and sliding motion, *Tribology International* 26 (1) (1993) 41-47.
- [255] G. Pintaúde, F.G. Bernardes, M.M. Santos, A. Sinatora, E. Albertin, Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion, *Wear* 267 (2009) 19-25.
- [256] A.N.J. Stevenson, I.M. Hutchings, Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test, *Wear* 195 (1996) 232-240.
- [257] S. Achanta, D. Drees, J.P. Celis, Investigation of friction on hard homogeneous coatings during reciprocating tests at micro-Newton normal forces, *Wear* 263 (2007) 1390-1396.
- [258] N. Axén, I.M. Hutchings, S. Jacobson, A model for the friction of multiphase materials in abrasion, *Tribology International* 29 (6) (1996) 467-475.
- [259] S.J. Bull, Can scratch testing be used as a model for the abrasive wear of hard coatings?, *Wear* 233-235 (1999) 412-423.
- [260] M. Dubar, A. Dubois, L. Dubar, Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD TiN coatings, *Wear* 259 (2005) 1109-1116.
- [261] C. Hsieh, Y.-C. Pan, Dynamic behavior and modelling of the pre-sliding static friction, *Wear* 242 (2000) 1-17.
- [262] J. Sato, G. de Silveira, I.M. Hutchings, Measurement of the friction of paper by the strip-on-drum method, *Tribology International* 30 (9) (1997) 633-640.
- [263] M.H. Staia, C. Enriquez, E.S. Puchi, Influence of the heat treatment on the abrasive wear resistance of electroless Ni-P, *Surface and Coatings Technology* 94-95 (1997) 543-548.
- [264] K.-H. Zum Gahr, Modeling and microstructural modification of alumina ceramic for improved tribological properties, *Wear* 200 (1996) 215-224.
- [265] V.K. Gorana, V.K. Jain, G.K. Lal, Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining, *Wear* 260 (2006) 128-139.
- [266] Y. Xie, J.A. Williams, The prediction of friction and wear when a soft surface slides against a harder rough surface, *Wear* 196 (1996) 21-34.
- [267] S.M. Nahvi, P.H. Shipway, D.G. McCartney, Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test, *Wear* 267 (2009) 2083-2091.

- [268] J. Goddard, H. Wilman, A theory of friction and wear during the abrasion of metals, *Wear* 5 (1962) 114-135.
- [269] L. Fang, X.L. Kong, J.Y. Su, Q.D. Zhou, Movement patterns of abrasive particles in three-body abrasion, *Wear* 162-164 (1993) 782-789.
- [270] P.H. Shipway, A mechanical model for particle motion in the micro-scale abrasion wear test, *Wear* 257 (2004) 984-991.
- [271] S.C. Santos, W.F. Sales, F. José da Silva, S.D. Franco, M. Bacci da Silva, Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools, *Surface and Coatings Technology* 184 (2004) 141-148.
- [272] Y. Kusano, I.M. Hutchings, Modelling the entrainment and motion of particles in a gap: application to abrasive wear, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 217 (6) (2003) 427-433.
- [273] V.A. Izhevskiy, L.A. Genova, J.C. Bressiani, A.H.A. Bressiani, Liquid phase sintered SiC ceramics from starting materials of different grade. *Cerâmica* 50 (2004) 261-267.
- [274] G.E.P. Box, J.S. Hunter, W.G. Hunter, *Statistics for Experimenters – Design, Innovation, and Discovery*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken – New Jersey, USA, 2005.
- [275] P.S. Guimarães, *Ajuste de curvas experimentais*, 1^a Edição, Editora UFSM, Santa Maria – RS, Brasil, 2001.
- [276] S. Vieira, *Análise de Variância – ANOVA*, 1^a Edição, Editora Atlas S.A., São Paulo – SP, Brasil, 2006.
- [277] CSM Instruments Inc
“<http://www.csm-instruments.com>”, página acessada em Fevereiro/2011.
- [278] Phoenix Tribology Ltd
“<http://www.phoenix-tribology.com>”, página acessada em Fevereiro/2011.
- [279] R. Bergantin, Projeto de máquina de desgaste por micro-abrasão, Trabalho de Formatura, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2002, 39 p. + Anexos.
- [280] K. Grigoroudis, D.J. Stephenson, Modelling low stress abrasive wear, *Wear* 213 (1997) 103-111.
- [281] S. Wirojanupatump, P.H. Shipway, Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus, *Wear* 239 (2000) 91-101.
- [282] A.C. Bozzi, J.D.B. de Mello, Wear resistance and wear mechanisms of WC–12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion, *Wear* 233-235 (1999) 575-587.

- [283] C. Henrique da Silva, Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2002, 294 p..
- [284] J. Larsen-Basse, Friction in two-body abrasive wear of a WC-Co composite by SiC, *Wear* 205 (1997) 231-235.
- [285] M.G. Gee, The formation of aluminium hydroxide in the sliding wear of alumina, *Wear* 153 (1992) 201-227.
- [286] M.G. Gee, D. Butterfield, The combined effect of speed and humidity on the wear and friction of silicon nitride, *Wear* 162-164 (1993) 234-245.
- [287] J.K. Lancaster, A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear, *Tribology International* 23 (6) (1990) 371-389.
- [288] J. Larsen-Basse, Influence of atmospheric humidity on abrasive wear – I. 3-body abrasion, *Wear* 31 (1975) 373-379.
- [289] J. Larsen-Basse, S.S. Sokoloski, Influence of atmospheric humidity on abrasive wear – II. 2-body abrasion, *Wear* 32 (1975) 9-14.
- [290] P.H. Shipway, S. Wirojanupatump, The role of lubrication and corrosion in abrasion of materials in aqueous environments, *Tribology International* 35 (2002) 661-667.
- [291] N. Gane, J. Skinner, The friction and scratch deformation of metals on a micro scale, *Wear* 24 (1973) 207-217.
- [292] N. Maan, A. Broese Van Groenou, Low speed scratch experiments on steels, *Wear* 42 (1977) 365-390.
- [293] R.C. Cozza, D.K. Tanaka, R.M. Souza, Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests, *Tribology International* (2011). *Artigo aceito para publicação.*

Apêndice 1

Determinação do coeficiente de atrito em equipamentos de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa disponíveis comercialmente

1. Equipamentos de configuração esfera-fixa

Em equipamentos de configuração esfera-fixa, a força normal é aplicada pelo sistema “peso-morto” [13-15,17-21,28,34,35,43,50,56,57,61,64], como mostra a Figura 1. O corpo-de-prova é fixo em uma haste, que é livre para girar em torno do “pino-pivot” (Detalhe A, Figura 1). Quando a carga C é aplicada, pela inserção dos “pesos-mortos”, a haste tende a revolutar-se em torno do “pino-pivot”, provocando o contato entre o corpo-de-prova e a esfera e, conseqüentemente, a atuação da força normal. A função do contra-peso é “equilibrar” o sistema, para que, na condição de $C = 0$, tenha-se $N = 0$.

Figura 1. Desenho esquemático da forma de aplicação da força normal em um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.

A Figura 2 exibe uma foto de um equipamento de configuração esfera-fixa (esquematizado na Figura 1), em que a aplicação da força normal é realizada pelo princípio de “pesos-mortos”. O modelo deste equipamento é Plint TE 66 – Micro-Scale Abrasion Tester, fabricado pela Phoenix Tribology Ltd – Inglaterra e pertence à Universidade de Coimbra – Portugal.

Figura 2. Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo Plint TE 66 (Micro-Scale Abrasion Tester), fabricado pela Phoenix Tribology Ltd – Inglaterra.
Foto: Cortesia Prof. Amílcar Lopes Ramalho, Universidade de Coimbra – Portugal.

Em relação à força tangencial, somente Gee e Wicks [53] relatam um equipamento de configuração esfera-fixa que, por meio de adaptações mecânicas e eletrônicas, possibilita a medição de T . A Figura 3a esquematiza o equipamento em sua configuração mecânica original e, a Figura 3b, as modificações realizadas por Gee e Wicks [53], para a medição da força tangencial.

Basicamente, o dispositivo utilizado para a medição da força tangencial baseia-se na deformação de uma mola. Conhecendo-se a constante elástica da mola e a deformação nela imposta, pode-se calcular a força tangencial gerada, por meio da Equação 1:

$$T = \beta y \quad (1)$$

sendo β , a constante elástica da mola e, y , a deformação imposta na mesma. O valor da deformação imposta na mola é obtido por um transdutor capacitivo de deslocamento¹ [53].

Com os valores de T e N , o coeficiente de atrito pode ser calculado pela Equação 2.31 – Capítulo 2.

¹ No equipamento relatado por Gee e Wicks [53], em ensaios de desgaste por micro-abrasão, a deformação aplicada na mola deve ser relativamente menor que o diâmetro da cratera de desgaste ($y \ll d$).

Figura 3. (a) Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa em sua configuração original [28]. (b) Equipamento modificado para a medição da força tangencial [53].

2. Equipamentos de configuração esfera-livre

Na configuração esfera-livre, a força normal é definida em função do peso da esfera (F_{es}) e da inclinação θ_1 do corpo-de-prova [28,41,43,45,46,49,271] (Figura 4), sendo diretamente proporcional ao peso da esfera e inversamente proporcional à inclinação θ_1 . Quanto maior o diâmetro da esfera e menor o ângulo θ_1 , maior a força normal atuando sobre o corpo-de-prova e vice-versa.

Figura 4. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre [45,271]. Força normal em função do peso da esfera e do ângulo θ_1 .

A força tangencial pode ser calculada de forma teórica, em função do peso da esfera e dos parâmetros geométricos do equipamento [29,33].

A Figura 5 mostra, esquematicamente, um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre e os parâmetros geométricos utilizados por Kusano e Hutchings [29], Rutherford e Hutchings [33].

Figura 5. Parâmetros geométricos de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre.

A seguir, está desenvolvida a rotina de cálculo das grandezas N , μ e T , proposta por Kusano e Hutchings [29], Rutherford e Hutchings [33].

Força Normal – N

- *Peso da esfera – F_{es}*

Na Figura 4, F_{es} é o peso da esfera, que pode ser determinado, praticamente, por meio de uma balança ou, matematicamente, pela Equação 2:

$$F_{es} = \gamma \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) \quad (2)$$

em que γ é o peso específico do material da esfera.

- *Força normal – N*

Em função do ângulo θ_1 e do peso da esfera, a força normal atuante sobre o corpo-de-prova pode ser definida por meio da Equação 3:

$$N = F_{es} \cos(\theta_1) \quad (3)$$

Entretanto, geralmente, em um ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, o pesquisador define o valor de N . Com isso, em um equipamento de configuração esférica livre, deve-se, na realidade, determinar o ângulo θ_1 (Equação 4) para se obter a força normal desejável.

$$\theta_1 = \left[\cos^{-1} \left(\frac{N}{F_{es}} \right) \right] \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4)$$

Na Equação 4, θ_1 é dado em graus ($^\circ$).

Na prática, não há necessidade de se realizar os cálculos expostos nas Equações 2 e 4. Na própria máquina, há uma célula de carga que mede a força normal atuante sobre o corpo-de-prova [28,45].

Coeficiente de atrito – μ

- Ângulo θ_2

Em função das dimensões do equipamento, Kusano e Hutchings [29], Rutherford e Hutchings [33] mostraram que o ângulo θ_2 pode ser determinado por meio da Equação 5:

$$\theta_2 = 90^\circ - \left[\cos^{-1} \left(\frac{L_1 - L_2 - R + r}{\sqrt{R^2 - 0,25l^2} + r} \right) \right] \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5)$$

em que r é o raio do eixo-motor. As grandezas L_1 , L_2 e l , estão exibidas na Figura 5. O ângulo θ_2 é dado em graus.

- Coeficiente de atrito – μ

Conhecendo-se os valores de θ_1 , θ_2 , F_{es} e N , o coeficiente de atrito é determinado por intermédio da Equação 6 [29,33]:

$$\mu = \frac{\frac{F_{es}}{N} \sin(\theta_2) - \sin(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (6)$$

Força tangencial – T

Conhecendo-se a força normal e o coeficiente de atrito, a força tangencial pode ser calculada pela Equação 7:

$$T = \mu N \quad (7)$$

Substituindo-se a Equação 6 na Equação 7, chega-se à Equação 8:

$$T = \frac{\frac{F_{es}}{N} \sin(\theta_2) - \sin(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)} N \quad (8)$$

Simplificando-se a Equação 8, tem-se equação para o cálculo da força tangencial em um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre (Equação 9):

$$T = \frac{F_{es} \sin(\theta_2) - N \sin(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (9)$$

Apêndice 2

Projeto e Construção de um Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa

1. Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2005

Embora as empresas “CSM Instruments Inc” [277] e “Phoenix Tribology Ltd” [278] dispunham, no mercado científico, equipamentos “ball-cratering”, entre 2003 e 2005, Ronaldo Câmara Cozza e os Professores Roberto Martins de Souza e Deniol Katsuki Tanaka discutiram, projetaram e construíram um equipamento para a realização de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [22]. Este projeto teve seu ponto inicial no Trabalho de Formatura de Renato Bergantin [279], e o resultado obtido foi a “Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2005”, descrita em detalhes na Dissertação de Mestrado de Ronaldo Câmara Cozza [22].

A Figura 1 apresenta uma visão geral desta máquina [22,51,52].

Figura 1. Visão geral da Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2005, construída entre 2003 e 2005 [22,51,52].

Para a realização de ensaios neste equipamento, inicialmente era necessária a usinagem de um furo na esfera para, então, fixá-la no eixo de ensaio por uma arruela de pressão e uma porca (Figura 2 [22,51,52]).

Figura 2. Fixação da esfera no eixo de ensaio [22,51,52].

Com esta máquina, foi finalizada a Dissertação de Mestrado de Ronaldo Câmara Cozza [22], além da publicação de dois trabalhos em periódicos internacionais – “*Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses*” e “*Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests*” nas revistas “*Surface and Coatings Technology*” e “*Wear*”, respectivamente [23,27] – e três artigos realizados com a colaboração do aluno de iniciação científica Raony Rossetti da Fonseca Zeferino [36-38].

Embora o equipamento estivesse fornecendo resultados que contemplassem exigências internacionais de publicação, este sistema trazia consigo, basicamente, quatro principais inconvenientes:

- (1) Dependendo da dureza da esfera, não era possível realizar a furação da mesma por processos convencionais de usinagem (*furação* e posterior *passagem de alargador*). O mesmo necessitava ser feito por eletroerosão (“a fio” ou “por penetração”);

- (2) O processo de eletroerosão possui um custo relativamente elevado, quando comparado a processos convencionais que oferecem o mesmo produto final. Por exemplo, há sete anos, o custo de usinagem para a realização de um furo de diâmetro 10 mm em uma esfera de aço AISI 52100 (temperado e revenido) de diâmetro 25,4 mm por processo de eletroerosão a fio foi fixado entre R\$ 80,00 e R\$ 120,00;
- (3) Dependendo do local e época do ano, o tempo para que o operador iniciasse o trabalho poderia ultrapassar duas semanas;
- (4) Nos ensaios, devido ao desgaste da esfera, era possível a utilização de somente um hemisfério da mesma. De uma forma geral, a esfera apresentava uma “vida útil” extremamente curta [22].

Após inúmeras discussões sobre a atual configuração da Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2005 e, em paralelo, análises dos resultados obtidos até então, a equipe decidiu por realizar um aprimoramento na mesma, o que incluiu modificações mecânicas, elétricas e eletrônicas.

A idéia de modificar a configuração do equipamento surgiu durante o trabalho que, em abril de 2007, viria a ser apresentado na “16th International Conference on Wear of Materials – WOM 2007”, realizada em Montreal – Canadá, o já mencionado “*Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests*” [23]. Durante discussões sobre este trabalho, os Professores Roberto Martins de Souza e Deniol Katsuki Tanaka, lançaram a proposta da realização de ensaios sob condições de pressão constante, o que desencadeou todo um processo para adaptar o atual equipamento com as novas idéias e necessidades surgidas, como descrito nos *Itens 2. e 3.*

2. Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2008

Em 2008, foi finalizado o primeiro aprimoramento do equipamento “Modelo LFS 2005”, no qual a rotação da esfera de ensaio e a aplicação da força normal passaram a ser assistidas por dois conjuntos “servo-controlador + servo-motor”, que serão detalhados no próximo item.

A Figura 3 apresenta o equipamento montado.

Figura 3. Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2008.

Com as modificações realizadas, foram finalizados os trabalhos “*Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests – preliminary results*” e “*Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – Preliminary results*” [12], apresentados na “ICAP 2008 – 1st International Conference on Abrasive Processes” e “WOM 2009 – 17th International Conference on Wear of Materials”, realizadas na Universidade de Cambridge – ING e Las Vegas – EUA, respectivamente, assim como o Exame de Qualificação de Doutorado de R.C. Cozza.

Acredita-se que, estas pesquisas foram as primeiras, efetivamente, a medir o coeficiente de atrito no sistema tribológico “esfera / partículas abrasivas / corpo-de-prova” e a realizar ensaios “ball-cratering” sob condições definidas como “pressão constante”, visto que, a rigor, a pressão desenvolvida durante os ensaios sofria ajustes em tempos predeterminados, de modo que a mesma tendesse a um valor nominal.

Mesmo com esses resultados pioneiros, o equipamento desenvolvido apresentava, ainda, duas desvantagens: *i*) toda a aquisição de dados era realizada de forma manual e *ii*) a esfera de ensaio, devido à própria configuração do sistema de fixação da mesma, apresentava uma excentricidade compreendida entre 21 e 27 μm .

Nesta configuração, assim como no tribômetro Plint TE 66 (Micro-Scale Abrasion Tester [278]) (Figuras 4a e 4b), a esfera de ensaio era fixada por dois eixos. A desvantagem deste sistema está relacionada à impossibilidade de retirar a excentricidade da esfera, visto que, após sua fixação entre os eixos, não há possibilidade de eventuais alinhamentos.

Figura 4. Fixação da esfera de ensaio nos equipamentos (a) Plint TE 66 e (b) LFS 2008.

Com isso, o Prof. Roberto Martins de Souza sugeriu a submissão de um Projeto de Auxílio à Pesquisa junto a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo –, de modo que a verba adquirida fosse direcionada na eliminação de tais deficiências.

Ainda em 2008, foi aprovado, integralmente, pela FAPESP, o “Processo N°. 2008/04477-8” e as modificações necessárias foram realizadas.

O Item 3. apresenta o resultado atual do processo de automatização do equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.

3. Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2010

3.1. Apresentação do equipamento

A Figura 5 exhibe uma visão geral da Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2010, desenvolvida no âmbito desta Tese de

Doutorado. Os Desenhos Técnicos Mecânicos e Elétricos da mesma estão disponíveis no Apêndice 3 – Desenhos Técnicos Mecânicos e Elétricos da Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2010.

Figura 5. Visão geral da Máquina de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa – Modelo LFS 2010.

Assim como os modelos anteriores, descritos nos *Itens 1. e 2.* [22,51,52], este modelo também realiza ensaios de desgaste micro-abrasivo, em materiais metálicos e não-metálicos, sob condições variadas de ensaios.

Basicamente, esta máquina divide-se em duas partes distintas: na “Unidade de Ensaio” realizam-se, efetivamente, os ensaios e, na “Unidade de Controle e Aquisição de Dados” são definidos os valores da rotação da esfera de ensaio, força normal e pressão aplicadas sobre o corpo-de-prova, além da aquisição dos valores de N , T e h_{cp} (deslocamento linear do corpo-de-prova).

3.2. Unidade de Ensaio – Componentes e Funcionamento

3.2.1. Esfera de ensaio – eixo de ensaio – servo-motor

Fixação da esfera de ensaio.

Diferente do sistema adotado no tribômetro Plint TE 66 (Micro-Scale Abrasion Tester [278]) (Figura 4a), em que a esfera de ensaio é fixada por (entre) dois eixos, no equipamento desenvolvido, a esfera é “colada” no eixo de ensaio (Figura 6a). Uma superfície côncava de raio $R = 12,7 \text{ mm}$ ($1/2''$) é, inicialmente, recoberta com adesivo CIANO CM1 e, em seguida, a esfera de ensaio é pressionada contra esta, fixando-se na mesma. Para zerar a excentricidade da esfera, o eixo de ensaio foi projetado de forma que fosse possível descolar, em um mesmo plano, a esfera de ensaio em duas direções perpendiculares (Figura 6b).

Figura 6. Equipamento modelo LFS 2010: (a) fixação da esfera de ensaio; (b) deslocamentos “horizontal” e “vertical” da esfera de ensaio.

Esta configuração permitiu o anulamento da excentricidade da esfera de ensaio, invalidando a afirmação de Gee e Wicks [53], que publicaram que é impossível retirar a excentricidade da mesma. Além disso, o desalinhamento medido por Gee e Wicks [53] – $20\text{-}24 \mu\text{m}$ – foi realizado no eixo, e não na esfera; provavelmente, se a medição fosse realizada diretamente na mesma, o valor da excentricidade seria maior.

O eixo de ensaio está apoiado por mancais de rolamento, com especificações P 204 (mancais) e Y204 V22 (rolamentos), fabricados pela FRM – Fábrica de Rolamentos e Mancais Ltda. e adquiridos junto à empresa RPL – Rolamentos Paulista Ltda.. A Figura 7 apresenta uma imagem dos mancais de rolamento utilizados.

Figura 7. Mancais de rolamento utilizados para sustentar o eixo de ensaio.

Rotação da esfera de ensaio.

O eixo de ensaio está unido a um servo-motor por um acoplamento elástico (Figura 8), fabricado em alumínio nodular e com o elemento flexível de poliuretano (PU). As especificações do servo-motor e do acoplamento são MKD 025 B – 144 – G P 0 – K N e K20, e foram adquiridos das empresas Rexroth – Bosch Group Ltda. e Zagretti – Indústria Mecânica Zagretti Ltda., respectivamente.

Figura 8. Fixação do eixo de ensaio no servo-motor, através de um acoplamento elástico.

O servo-motor transmite a rotação para o eixo e, conseqüentemente, para a esfera de ensaio. A maneira pela qual a rotação é variada e controlada, será explicada posteriormente.

Bases de apoio.

Os mancais de rolamento e o servo-motor estão sustentados por duas bases, construídas de madeira e revestidas com fórmica (Figura 9).

Figura 9. Bases construídas para as fixações dos mancais de rolamento e do servo-motor.

Como a fixação do servo-motor deve ser realizada pela parte frontal do mesmo, deixando-o em balanço, na extremidade oposta (em balanço) foi fixado um suporte de aço-carbono para melhorar a sua fixação. A Figura 10 mostra o suporte inserido.

Figura 10. Suporte auxiliar utilizado para melhorar a fixação do servo-motor.

3.2.2. Fornecimento da pasta abrasiva

Durante os ensaios, a pasta abrasiva é suprida, na região de contato “esfera de ensaio – corpo-de-prova”, com o auxílio de uma bomba peristáltica, modelo DosaMini 4000 e fornecida pela empresa Provitec – Sistemas de Controle e Dosagem Ltda.¹. Para evitar a decantação do material abrasivo, a solução é, durante os ensaios, continuamente agitada por uma batedeira elétrica. Na Figura 11 tem-se uma imagem destes itens.

¹ A equipe agradece ao Eng. Axel von Huelsen pela atenção e ajuda na correta seleção da bomba peristáltica, que realizou-se na própria empresa, em Interlagos, São Paulo.

Figura 11. Bomba peristáltica utilizada para o suprimento da pasta abrasiva durante os ensaios. A bateadeira é adotada para evitar a decantação do material abrasivo.

O acionamento elétrico e o controle de vazão da mesma são realizados por um potenciômetro, localizado em sua parte frontal (Figura 11). Esta configuração é do próprio fabricante; mas, para facilitar seu manuseio, foi instalado um interruptor elétrico, de forma que, a energização da bomba peristáltica se dá pelo interruptor e, o controle de vazão da pasta abrasiva, pelo potenciômetro. É uma modificação simples, mas importante para a metodologia dos ensaios, assegurando que a vazão desejada permaneça inalterada, após o pesquisador ligar e desligar a bomba peristáltica consecutivas vezes.

Esta bomba peristáltica está fixada em um suporte construído com chapas de aço-carbono, como mostra a Figura 12.

Figura 12. Fixação da bomba peristáltica. Ao lado do suporte da bomba peristáltica está o interruptor elétrico.

3.2.3. Sistema de posicionamento e avanço/recuo do corpo-de-prova

Mesa de transferência – servo-motor.

A Figura 13 mostra a “mesa de translação”, também denominada “mesa de transferência”. Neste conjunto, tem-se o “berço de movimentação” e, fixada ao mesmo, está uma porca que realiza seu movimento de “avanço”, ou “recuo”.

Figura 13. Porca fixada no berço de movimentação para a realização do movimento de “avanço”, ou “recuo” do mesmo.

A rotação do “fuso de transmissão” é realizada por meio de um servo-motor (modelo MKD 025 B – 144 – G P 0 – K N e, também, fornecido pela Rexroth – Bosch Group Ltda.). O fuso de transmissão e o servo-motor estão conectados por meio de um acoplamento elástico, fabricado em alumínio nodular, comprado da empresa Zagretti – Indústria Mecânica Zagretti Ltda. (modelo K20). Quando o fuso de transmissão rotaciona, move a porca que, por sua vez, transforma a rotação do fuso de transmissão em movimento linear (“avanço” ou “recuo”) do berço de movimentação. As Figuras 14a e 14b mostram a montagem mencionada.

Figura 14. (a)-(b) Método de deslocamento linear do berço de movimentação, realizado pela rotação do fuso de transmissão em conjunto com a porca, que se sucede através do servo-motor.

Base de apoio.

Tanto a mesa de translação, quanto o servo-motor estão fixados em uma base fabricada de madeira e revestida com fórmica. Assim como no servo-motor que controla a rotação da esfera de ensaio, neste, também foi utilizado um suporte (duas cantoneiras de aço-carbono) em sua extremidade em balanço, para melhorar sua fixação. A Figura 15 exibe estes itens.

Figura 15. Montagens da mesa de translação e do servo-motor.

Posicionamentos horizontal e vertical do corpo-de-prova.

Em um mesmo corpo-de-prova podem ser realizados vários ensaios. O equipamento possui um Sistema de Posição Horizontal (SPH) e um Sistema de Posição Vertical (SPV) (Figura 16). O ajuste de posição, para ambos os sistemas, pode ser realizado com uma precisão de 10 μm . Estes dois mecanismos estão fixados sobre o berço de movimentação da mesa de translação.

Figura 16. Sistema de Posição Horizontal (SPH) e Sistema de Posição Vertical (SPV).

A Figura 17 exibe um corpo-de-prova com a indicação das possíveis translações que o mesmo pode adquirir. Foi desenvolvido um dispositivo para suportar o corpo-de-prova e as células de carga utilizadas nas medições das forças “normal” e “tangencial”; tal mecanismo será abordado no Item 3.3.4..

Figura 17. Corpo-de-prova e células de carga adotadas nas medições de N e T . Indicação dos deslocamentos “horizontal” e “vertical”, possíveis de serem realizados pelo corpo-de-prova.

3.3. Unidade de Controle e Aquisição de Dados – Componentes e Funcionamento

3.3.1. Controle e aquisição de dados

Há três valores que, efetivamente, podem (e, até o momento, são necessários) ser monitorados durante os ensaios: *i*) “força normal” aplicada sobre o corpo-de-prova, *ii*) “força tangencial” desenvolvida durante os ensaios e *iii*) “deslocamento linear do corpo-de-prova”.

Os valores de N e T são obtidos por uma placa de aquisição de dados, fabricada pela Lynx – Tecnologia Eletrônica Ltda. – modelo ADS0500.

A Figura 18 apresenta a montagem do hardware de aquisição de N e T .

Figura 18. Placa de aquisição de dados utilizada na captação dos valores de N e T ; fabricante: Lynx – Tecnologia Eletrônica Ltda. – modelo: ADS0500.

O deslocamento linear do corpo-de-prova – h_{cp} – é medido de forma direta, por intermédio de uma régua linear (que mede o deslocamento do corpo-de-prova) e um leitor digital (que indica o valor deste deslocamento). Os modelos destes instrumentos são, respectivamente, KA300-470 e SDS3-1, fabricados por Sino L. Digital Ltd.. Neste sistema, é possível ter-se uma precisão de 1 μm .

Para a fixação da régua linear, foi construído um suporte com três perfis “U” e, internamente ao mesmo, fixada uma peça de granito retificado, na qual apoia-se a régua linear. A alocação desta peça deu-se para evitar a flexão da régua linear.

Finalmente, a fixação da régua linear no berço de movimentação (da mesa de translação) foi realizada por um par de cantoneiras.

As Figuras 19a e 19b mostram a régua linear e o suporte construído e, a Figura 19c, a união da régua linear com o berço de movimentação. Na Figura 19d está o leitor digital, referente à régua linear.

Figura 19. (a)-(b) Régua linear fixada no suporte construído com perfis “U” e uma peça de granito retificado; (c) régua linear unida ao berço de movimentação; (d) leitor digital.

3.3.2. “Start-up” dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”

O servo-motor que rotaciona a esfera de ensaio e o que aplica a força normal sobre o corpo-de-prova trabalham em conjunto com os servos-controladores DKC11.3-040-7 e DKC01.3-040-7, geração Eco Drive, respectivamente, exibidos na Figura 20. Ambos servos-controladores estão fixados em uma base construída de madeira e revestida com fórmica. Posteriormente, será explicado o critério com que cada servo-controlador foi direcionado ao controle de rotação e força normal.

Figura 20. (a) Servos-controladores modelos DKC11.3-040-7 (esquerda) e DKC01.3-040-7 (direita), geração Eco Drive, que trabalham em conjunto com os servos-motores utilizados para controlar a rotação da esfera de ensaio e a força normal aplicada sobre o corpo-de-prova, respectivamente; (b) instalação eletroeletrônica.

Toda a instalação dos servos-motores e servos-controladores foi realizada no próprio Laboratório de Fenômenos de Superfícies. Após a finalização de toda a montagem e antes do “start-up” dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”, uma completa averiguação da instalação eletroeletrônica foi conduzida pelos engenheiros da Rexroth – Bosch Group Ltda.². Esta inspeção foi realizada nas unidades de Diadema e Atibaia – SP.

Modos de operação dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”.

Cada conjunto “servo-motor + servo-controlador” pode trabalhar em três modos de operação distintos: “rotação”, “posição” e “torque”.

O conjunto que controla a rotação da esfera de ensaio está operando na opção “rotação” e o conjunto utilizado na aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova está programado para trabalhar no modo “posição”, como será explicado.

² A equipe agradece a Vitor Benkard Lira, Paulo Zanini e Rafael Rosolen, funcionários da Rexroth – Bosch Group Ltda., por toda atenção e ajuda, durante e após o “start-up” dos equipamentos.

3.3.3. Sistema de controle de rotação da esfera de ensaio

Faixas de rotações.

A rotação máxima que o servo-motor é capaz de atingir vale $n_{SM}^{máx} = 9.000$ rpm. Com o programa DriveTop16V09, utilizado nas programações dos servos-controladores, é possível definir faixas de rotações, que variam de $n_{SM}^{mín} = 0$ rpm (sempre) até um valor desejado (no máximo de $n_{SM}^{máx} = 9.000$ rpm). Por exemplo, pode-se estabelecer uma faixa entre $n_{SM}^0 = 0$ rpm e $n_{SM}^{10} = 1.000$ rpm; respeitando-se a precisão de 0,0001 rpm, é possível obter quaisquer valores dentro desta faixa.

Aplicação e leitura de $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ e $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC}$.

Aplicando-se, no servo-controlador, uma tensão contínua entre $U_{SC}^{mín} = 0 \text{ V}_{CC}$ e $U_{SC}^{máx} = 10 \text{ V}_{CC}$, a rotação do eixo do servo-motor é alterada. Para o exemplo numérico dado no parágrafo anterior, $U_{SC}^{mín} = 0 \text{ V}_{CC}$ está, necessariamente, relacionada com $n_{SM}^0 = 0$ rpm e, $U_{SC}^{máx} = 10 \text{ V}_{CC}$ com $n_{SM}^U = 1.000$ rpm. De forma linear, variando-se esta tensão contínua aplicada no servo-controlador, a rotação do eixo do servo-motor irá variar.

Um circuito que execute essa função, necessária para o funcionamento do conjunto “servo-motor + servo-controlador” que define a rotação da esfera de ensaio, não foi fornecido pela Rexroth – Bosch Group Ltda., embora esteja disponível para compra. A opção foi projetar e construir este aparelho, o que foi realizado com um valor monetário inferior ao ofertado pela Rexroth – Bosch Group Ltda.. A Figura 21 exhibe o aparelho projetado e construído.

Figura 21. Aparelho utilizado para alimentar o servo-controlador entre $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$.

Os servos-controladores, independente do modo de operação, devem ser alimentados sob uma tensão contínua e constante de $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC} [\pm 10\%]$. Esta tensão foi obtida a partir de uma Fonte de Corrente Contínua (Fonte CC), exibida na Figura 22.

Figura 22. Fonte CC utilizada para aplicar $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC}$ em ambos servos-controladores.

Esta mesma Fonte de Corrente Contínua está sendo utilizada na aplicação de $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ para a variação de rotação³. Para isso, o circuito da Figura 21 foi montado com três potenciômetros em série, de forma que dois são mantidos em valores iguais e constantes, e o terceiro realiza a variação de voltagem propriamente dita. Os três potenciômetros possuem resistência elétrica (máxima) de $\Gamma_{pot}^{máx} = 5 \text{ k}\Omega$.

O circuito que varia a tensão contínua $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ foi chamado de Circuito de Variação, para diferenciá-lo do Circuito de Leitura e Controle. Estes dois circuitos trabalham em conjunto. Na Figura 23 está o Circuito de Leitura e Controle.

³ Além de $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC}$, o servo-controlador programado na opção “rotação” deve, também, ser alimentado sob $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$.

Figura 23. Circuito de Leitura e Controle, projetado e construído para trabalhar em conjunto com o Circuito de Variação.

A tensão $U_{SC}^{min-max} = 0-10 \text{ V}_{CC}$, que é diversificada por meio do Circuito de Variação, pode ser lida no próprio software do servo-controlador, o DriveTop16V09. Mas, caso não esteja disponível um micro-computador⁴, a leitura desta tensão pode ser realizada com o auxílio de um multímetro (ou, um voltímetro), que deve ser conectado nos bornes laterais do Circuito de Leitura e Controle (Figura 23). Além desta função, pelo Circuito de Leitura e Controle, através de uma chave “H” (Figura 23), é possível alterar o sentido de rotação (“horário” e “anti-horário”) da esfera de ensaio, que ocorre pela inversão das polaridades “positiva” (“+”) e “negativa” (“–”) (provenientes da Fonte CC) que são aplicadas no servo-controlador.

3.3.4. Sistema de aplicação e controle da força normal e pressão sobre o corpo-de-prova

Condicionamento das células de carga.

No Sistema de Posição Vertical estão fixadas as células de carga que medem a força normal (N) aplicada e a força tangencial (T) desenvolvidas no decorrer dos ensaios, por meio de um conjunto mecânico que sustenta estas células de carga e o corpo-de-prova; tal mecanismo foi denominado “Conjunto Suporte”.

O modelo da célula de carga que controla a força normal é S-5 (capacidade nominal – C_n : 50 N – máxima sobrecarga admissível: 150% C_n) e o modelo da célula de carga que mede a força tangencial é GL 2 ($C_n = 20 \text{ N}$ – máxima sobrecarga admissível: 150% C_n). Ambas foram adquiridas da empresa Alfa – Instrumentos Eletrônicos Ltda..

⁴ Dependendo da aplicação, após as programações dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”, o uso do micro-computador torna-se facultativo.

A Figura 24 exibe as células de carga montadas no Sistema de Posição Vertical pelo Conjunto Suporte.

Figura 24. Células de carga utilizadas para controlar a força normal e medir a força tangencial desenvolvida durante os ensaios, fixadas no Sistema de Posição Vertical por meio do Conjunto Suporte.

Aplicação e manutenção de N e P constantes.

Inicialmente, a tentativa foi aplicar a força normal por meio do modo “torque”. Entretanto, para a aplicação e controle da mesma, é necessário que o berço de movimentação se locomova para frente (aumentando a força normal) ou para trás (diminuindo a força normal). Com isso, é indiferente o par “servo-motor + servo-controlador” operar em modo “torque” ou “posição”. Por outro lado, em termos práticos, é mais vantajoso realizar os ensaios na seleção “posição”; isso porque, para que o servo-motor trabalhe na opção “torque”, é necessário que o mesmo esteja constantemente carregado, ou seja, sempre deve haver alguma carga na ponta do eixo do servo-motor e, para $N = 0$, o servo-motor deve estar, necessariamente, descarregado.

Na prática, não seria possível aplicar e controlar a força normal somente por “torque”. Seria necessária a união de dois modos de operação: “posição”, para avançar ou recuar o corpo-de-prova, e “torque”, para aplicar a força normal. A opção pelo modo “posição” trouxe, consigo, simplificações na programação do servo-controlador e no hardware possivelmente necessário, sem comprometer o princípio de aplicação e controle da força normal.

O servo-controlador utilizado foi o modelo DKC01.3-040-7, que possui “interface paralela”, necessária ao controle de “posição”. Neste modo de operação, não são necessários o “Circuito de Variação” e o “Circuito de Leitura e Controle” (embora, também, tenham sido

construídos para o servo-controlador utilizado na aplicação e controle da força normal), e é possível a escolha de duas opções de deslocamento: “angular” e “linear”.

Na opção “deslocamento angular”, o eixo do servo-motor gira sob ângulos preestabelecidos; por exemplo, o eixo pode girar $0,01^\circ$, 45° ou 720° , conforme os valores desejados. Aqui, a opção escolhida foi “deslocamento linear” e levou em consideração o passo da rosca do fuso de transmissão que locomove o berço de movimentação (Figuras 13 e 14).

Com isso, a força normal é controlada pelo movimento linear do berço de movimentação, cujo princípio de funcionamento foi detalhado no tópico “*Mesa de transferência – servo-motor*”. Quando o berço de movimentação “avança”, levando consigo os Sistemas de Posições “Horizontal”, “Vertical” e o “Conjunto Suporte” e, conseqüentemente, o corpo-de-prova, tem-se o incremento da força normal; no “recuo”, de todo o conjunto, há o decremento da mesma.

Baseado no “avanço” ou “recuo” do corpo-de-prova, a manutenção da “pressão” na condição “constante” origina-se, também, por este princípio. Com a ascensão de A_t , o corpo-de-prova “avança”, de modo a aumentar N e manter P constante.

Para efetivar esse “avanço” ou “recuo” do corpo-de-prova, foram definidos quatro valores de deslocamento para o avanço do corpo-de-prova e quatro valores para o recuo: 1 mm, 0,1 mm, 0,01 mm e 0,001 mm para o avanço; -1 mm, -0,1 mm, -0,01 mm e -0,001 mm para o recuo. Estes oito valores de deslocamento estão relacionados a oito combinações binárias, formando os denominados “blocos de posição”. A Tabela 1 mostra a relação entre os valores dos deslocamentos lineares e os números binários.

Tabela 1. Combinações binárias e os respectivos deslocamentos lineares.

Bloco de posição	Combinação binária	Deslocamento (h_{cp}) [mm]	Ação (“Avanço” ou “Recuo” do corpo-de-prova)	N
0	000	1	Avanço	Aumento
1	001	0,1	Avanço	Aumento
2	010	0,01	Avanço	Aumento
3	011	0,001	Avanço	Aumento
7	111	-0,001	Recuo	Diminuição
6	110	-0,01	Recuo	Diminuição
5	101	-0,1	Recuo	Diminuição
4	100	-1	Recuo	Diminuição

As combinações binárias “000”, “001”, “010”, “011”, “111”, “110”, “101” e “100”, estão relacionadas, necessariamente, aos blocos de posição “0”, “1”, “2”, “3”, “7”, “6”, “5” e “4”, respectivamente. Esta ordem foi estabelecida com o intuito de facilitar o controle da força normal durante os ensaios.

O servo-controlador foi programado com estes valores, por meio do programa DriveTop16V09. Para realizar cada combinação binária, foi montado um circuito com três botões “Liga/Desliga” e um botão pulsador; este circuito, comumente denominado de “Régua-de-Chaves”, foi conectado à interface paralela do servo-controlador.

Foram utilizados três botões “Liga/Desliga” pois, cada botão possui duas posições: “Ligado” ou “Desligado”, “Aberto” ou “Fechado”, ou, “0” (zero) ou “1”, respectivamente. Com três botões de duas opções de posição cada, é possível realizar oito combinações ($2^3 = 8$) de “0” e “1”, conforme a Tabela 1.

A posição normal do botão pulsador é “Aberto”. Acionando-se (ou, “pulsando-se”) este botão, a posição passa para “Fechado”, executando o “bloco de deslocamento” definido. Por exemplo, efetuando-se a combinação binária “000” e acionando-se uma vez o botão pulsador, o corpo-de-prova vai avançar (no sentido de aplicação – aumento – da força normal) $h_{cp} = 1$ mm. Para realizar outros deslocamentos de 1 mm (por exemplo), o pesquisador deve acionar o botão pulsador, quantas vezes forem necessárias. Na combinação “100”, o corpo-de-prova recuará (no sentido de diminuir a força normal) 1 mm e essa metodologia vale para todas as outras combinações.

3.3.5. Energizações dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”

As energizações dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador” estão sendo realizadas sob uma tensão nominal de $U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC}$ (3~). A faixa de tensão alternada admissível para alimentar os conjuntos está de 200–480 V [$\pm 10\%$], sendo possível a alimentação em $U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC}$ (monofásico). A Figura 25 mostra a conexão da rede trifásica no servo-controlador utilizado para controlar a rotação da esfera de ensaio. Esta instalação é análoga à realizada no servo-controlador utilizado na aplicação e controle da força normal sobre o corpo-de-prova.

Figura 25. Conexão da rede trifásica ($U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC}$) no servo-controlador selecionado para controlar a rotação da esfera de ensaio. Instalação análoga à realizada no servo-controlador direcionado a aplicação e controle da força normal sobre o corpo-de-prova.

Por intermédio de dois contatores, os conjuntos de “servos” podem ser energizados de forma independente ou simultaneamente. A Figura 26 mostra os contatores utilizados.

Figura 26. Contatores utilizados para as energizações dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”.

Para os acionamentos destes contatores, na tampa do quadro de força⁵ foram fixados seis botões pulsadores: três botões “Liga” (1 NA – “Normalmente Aberto”, cor: verde) e três botões “Desliga” (1 NF – “Normalmente Fechado”, cor: vermelho). Um par é utilizado para energizar e desenergizar o conjunto direcionado ao controle de rotação; outro, energiza e desenergiza o conjunto “servo-motor + servo-controlador” utilizado na aplicação e controle da

⁵ Inicialmente, o quadro de força utilizado foi recuperado; os furos pré-existentes em sua tampa foram preenchidos com chapas de aço-carbono e, em seguida, o mesmo passou por uma pintura.

força normal e, um terceiro par de botões pulsadores, energiza e desenergiza, simultaneamente, ambos conjuntos. Além disso, é possível ter-se os dois conjuntos energizados acionando-se cada um separadamente.

Para cada conjunto “servo-motor + servo-controlador”, há uma lâmpada sinalizadora verde, que indica qual par está energizado; se ambos estiverem, duas lâmpadas ficam acesas. A Figura 27 mostra os pares de botões e suas respectivas lâmpadas.

Figura 27. (a) Pares de botões pulsadores utilizados para energizar (botões verdes) e desenergizar (botões vermelhos) os conjuntos “servo-motor + servo-controlador”. As lâmpadas verdes (quando acesas) indicam quais conjuntos estão energizados; (b) ligações elétricas dos botões pulsadores.

Ainda no quadro de força, há uma chave-geral (fabricada pela empresa STECK – Indústria Elétrica Ltda.). Esta, efetivamente, conecta os contadores na rede elétrica do laboratório (Figura 28).

Figura 28. (a) Chave-geral que conecta fisicamente os contadores na rede elétrica do LFS; (b) ligações elétricas da chave-geral.

Procedimentos preventivos nas energizações e desenergizações dos conjuntos “servo-motor + servo-controlador”.

Após conversas com os engenheiros da Rexroth – Bosch Group Ltda., por precaução, sugere-se uma sequência determinada de etapas para energizar os conjuntos “servo-motor + servo-controlador”. Esta sequência foi definida como Etapas de Energização 1, 2 e 3:

1) *Ligar a Fonte CC*

Ambos servos-controladores serão submetidos a $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC}$. Em seus displays (Figura 20a), irá surgir a sigla “AF” e, rapidamente, mudará para “bb”, que significa “pronto para operar”;

2) *“Fechar” a chave-geral*

Os contadores estarão conectados fisicamente na rede elétrica do laboratório;

3) *Habilitar os contadores*

Os conjuntos de “servos” estarão sob a tensão nominal de $U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC} (3\sim)^6$. Quando esta ação for realizada, a mensagem no display do servo-controlador vai mudar de “bb” para “AF”, que significa “pronto para movimentar”. Na realidade, quando a chave “H” é fechada que, efetivamente, a $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ é aplicada no servo-controlador.

Após a finalização das Etapas de Energização 1, 2 e 3, para o conjunto “servo-motor + servo-controlador” que define a rotação da esfera de ensaio, recomenda-se que seja seguida a seguinte sub-rotina:

1) *Ligar o Circuito de Variação*

Foi instalado um interruptor na entrada do mesmo. Após o interruptor ser posto na posição “Fechado”, o potenciômetro estará hábil a fornecer $U_{SC}^{mín-máx} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ ao servo-controlador;

2) *Ligar o Circuito de Leitura e Controle*

Na chave “H”, que realiza a inversão de rotação da esfera de ensaio, há um ponto neutro. Para definir o sentido de rotação da esfera (“horário” ou “anti-horário”), o pesquisador deve “fechar” este botão na posição de um dos sentidos desejados.

⁶ Recomenda-se que, entre um ensaio e outro, os conjuntos “servo-motor + servo-controlador” não sejam desenergizados. Os servos-controladores possuem ventilação própria, que se dá por ventiladores internos e a refrigeração dos servos-motores ocorre por convecção natural.

Quanto à desenergização dos equipamentos, assim como na energização, recomenda-se o acompanhamento dos seguintes passos (Etapas de Desenergização 1, 2, 3, 4 e 5):

1) *Desligar o Circuito de Leitura e Controle*

A chave “H”, do Circuito de Leitura e Controle, deve ser posicionada no ponto neutro. Com isso, o fornecimento $U_{SC}^{min-max} = 0-10 \text{ V}_{CC}$ é cancelado (para o servo-controlador que controla a rotação da esfera de ensaio);

2) *Desligar o Circuito de Variação*

O interruptor deve ser posto na posição “Aberto” (para o servo-controlador que controla a rotação da esfera de ensaio);

3) *Desabilitar os contadores*

A alimentação $U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC} (3\sim)$ será cessada;

4) *“Abrir” a chave-geral*

Os contadores serão desconectados fisicamente da rede elétrica do laboratório;

5) *Desligar a Fonte CC*

Os servos-controladores serão desligados.

Programação dos servos-controladores.

As programações dos servos-controladores são realizadas em um micro-computador, por meio do programa DriveTop16V09.

Para conectar os servos-controladores no micro-computador, foi montado um cabo com entradas D-SUB 15 – “Macho” e D-SUB 9 – “Fêmea”, para conexões nos servos-controladores e micro-computador, respectivamente.

É possível que ambos servos-controladores sejam conectados, simultaneamente, no micro-computador, pois os mesmos possuem um sistema de endereçamento que os distinguem. Até o momento, está sendo possível realizar a conexão de um servo-controlador de cada vez, devido ao número de “portas” disponíveis no micro-computador.

Para iniciar a programação, primeiro deve-se alimentar o servo-controlador em $U_{SC}^{alm} = 24 \text{ V}_{CC}$ e, em seguida, “abrir” o programa DriveTop16V09 que, automaticamente, irá procurar o servo-controlador conectado ao micro-computador. Não é necessário que o conjunto em programação esteja sob $U_{SC+SM}^{alm} = 220 \text{ V}_{AC} (3\sim)$.

Para encerrar a programação e, se necessário, desligar o servo-controlador, primeiro o pesquisador deve “sair” do programa DriveTop16V09 e, após, desligar a Fonte CC

(desligando, portanto, o servo-controlador). Caso esta sequência não seja obedecida (ou seja, a Fonte de Corrente Contínua seja desligada antes de “sair” do programa DriveTop16V09) o programa irá acusar um “erro” de que não há resposta do “drive” (“No response from drive 1”).

Para um completo detalhamento sobre as possíveis programações, recomenda-se que o interessado consulte os manuais pertinentes.

Apêndice 3

DETALHE A
Escala 2,5:1

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$
Tratamentos Térmicos: *Têmpera + Revenimento*

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

01A	01	Eixo de Ensaio - Extremidade Fixa		Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma		Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO			Desenho 01A
				Esc. 1:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

02A	01	Eixo de Ensaio - Extremidade Móvel		Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma		Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
				Esc. 1:1	Desenho 02A
				Data: 20/07/10

DETALHE A
Escala 2,5:1

SECÇÃO AA

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

03A	01	Ponta Fixadora	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MAQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASAO	Esc. 2:1
			Desenho 03A
			Data: 20/07/10

DETALHE A
Escala 2,5:1

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

Tratamentos Térmicos: Têmpera + Revenimento

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

01B	01	Eixo de Ensaio - Extremidade Fixa		Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma		Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
				Esc. 1:1	Desenho 01B
				Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

02B	01	Eixo de Ensaio - Extremidade Móvel		Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma		Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
				Esc. 1:1	Desenho 02B
				Data: 20/07/10

DETALHE A
Escala 2,5:1

SECÇÃO AA

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

03B	01	Ponta Fixadora	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Esc. 2:1
			Desenho 03B
			Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

02C	01	Ponta 1	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 02C
			Esc. 1:1 Data: 19/09/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

03C	01	Ponta 2	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 03C
			Esc. 1:1 Data: 19/09/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

04C	01	Placa de Apoio	Aço ABNT 1010-1020
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 04C
			Esc. 1:1 Data: 19/09/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

04	02	Base	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 04
			Esc. 1:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

05	01	Berço de Movimentação	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 05
			Esc. 1:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

06	04	Bucha	Bronze
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 06
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

07	02	Guia	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 07	Data: 20/07/10
			Esc. 1:1

DETALHE A

Escala 2:1
Medidas para o
Anel Elástico

DETALHE B
Escala 2:1
Medidas para o
Anel Elástico

Tolerâncias Gerais: ±0,1

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

08	01	Parafuso de Transmissão Aço ABNT 1050		
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
			Esc. 1:1	Desenho 08
			Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

09	01	Porca	Aço ABNT 1010-1020
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 09
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

10	01	Base A - SPH	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 10
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

11	01	Base B - SPH	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 11
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

12	01	Base de Movimentação - SPH	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 12
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

CORTE AA

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

13	01	Bucha Cônica Roscada	PTFE
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 13
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

14	02	Guia - SPH	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 14
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: ±0,1

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

15	01	Parafuso de Movimento - SPH	Aço ABNT 1050	
Piça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Esc. 2:1
				Desenho 15
				Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

16	01	Estrutura - SPV	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 16
			Esc. 1:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

17	01	Apoio - SPV	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 17
			Esc. 1:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

18	01	Base de Movimentação - SPV	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI	Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 18
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

19	05	Bucha - SPV	Bronze
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 19
			Esc. 5:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

20	02	Guia - SPV	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 20
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

21	01	Parafuso de Movimento - SPV	Aço ABNT 1050
Piça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
Departamento de Engenharia Mecânica			
Esc. 2:1		Desenho 21	
Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

22	01	Placa de Apoio	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 22
			Esc. 1:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

23	01	Base de Fixação	Aço ABNT 1050
Piça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO			
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica	Esc. 2:1
		Desenho 23	Data: 20/07/10

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

24	01	Suporte - Célula de Carga - FT	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 24
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

25	01	Suporte - Célula de Carga - FN	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 25
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

26	01	Eixo	Aço ABNT 1050	
<i>Peça N.</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Denominação/Norma</i>	<i>Material</i>	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		<i>Desenho 26</i>
			Esc. 2:1	<i>Data: 20/07/10</i>

27	01	Suporte - Corpo-de-Prova	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRAÇÃO	Desenho 27
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

28	02	Placa Fixadora	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 28
			Esc. 2:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

29	01	Apoio - Corpo-de-Prova	Aço ABNT 1050
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 29
			Esc. 1:1 Data: 20/07/10

Tolerâncias Gerais: $\pm 0,1$

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

30	01	Contato	Aço ABNT 1050	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 30
			Esc. 2:1	Data: 20/07/10

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

33	08	Parafuso M8x100 - DIN 912
32	02	Anel Elástico Ø10 - DIN 471
31	02	Rolamento Radial de Esferas - NSK / Z0009
09	01	Porca
08	01	Parafuso de Transmissão
07	02	Guia
06	04	Bucha
05	01	Berço de Movimentação
04	02	Base

Peca N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO		Desenho 31
FEI			Esc. 1:1	
Departamento de Engenharia Mecânica				Data: 14/08/10

MESA DE TRANSLAÇÃO

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

35	08	Parafuso <i>M4x25</i> - DIN 912	
34	02	Parafuso Prisioneiro - Sext. Interno <i>M4x5</i> - DIN 912	
32	01	Anel Elástico Ø10 - DIN 471	
15	01	Parafuso de Movimento - SPH Aço ABNT 1050	
14	02	Guia - SPH Aço ABNT 1050	
13	01	Bucha Cônica Roscada PTFE	
12	01	Base de Movimentação - SPH Aço ABNT 1050	
11	01	Base B - SPH Aço ABNT 1050	
10	01	Base A - SPH Aço ABNT 1050	

Peca N.	Quantidade	Denominação/Norma	MATERIAL
FEI		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Esc. 2:1 Desenho 32 Data: 15/08/10

SISTEMA DE POSIÇÃO HORIZONTAL - SPH

MONTAGEM
MESA DE TRANSLAÇÃO /
SISTEMA DE POSIÇÃO
HORIZONTAL

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

35	08	Parafuso <i>M4x25</i> - DIN 912
34	02	Parafuso Prisioneiro - Sext. Interno <i>M4x5</i> - DIN 912
33	08	Parafuso <i>M8x100</i> - DIN 912
32	03	Anel Elástico $\varnothing 10$ - DIN 471
31	02	Rolamento Radial de Esferas - NSK / Z0009
15	01	Parafuso de Movimento - SPH Aço ABNT 1050
14	02	Guia - SPH Aço ABNT 1050
13	01	Bucha Cônica Roscada PTFE
12	01	Base de Movimentação - SPH Aço ABNT 1050
11	01	Base B - SPH Aço ABNT 1050
10	01	Base A - SPH Aço ABNT 1050
09	01	Porca Aço ABNT 1010-1020
08	01	Parafuso de Transmissão Aço ABNT 1050
07	02	Guia Aço ABNT 1050
06	04	Bucha Bronze
05	01	Berço de Movimentação Aço ABNT 1050
04	02	Base Aço ABNT 1050

SISTEMA DE POSIÇÃO VERTICAL - SPV

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

38	02	Arruela de Pressão Ø5 - DIN 7980	21	01	Parafuso de Movimento - SPV	Aço ABNT 1050
37	02	Parafuso M5x25 - DIN 912	20	02	Guia - SPV	Aço ABNT 1050
36	04	Arruela de Pressão Ø4 - DIN 7980	19	05	Bucha - SPV	Bronze
35	04	Parafuso M4x25 - DIN 912	18	01	Base de Movimentação - SPV	Aço ABNT 1050
34	10	Parafuso Prisioneiro - Sext. Interno M4x5 - DIN 912	17	01	Apoio - SPV	Aço ABNT 1050
32	01	Anel Elástico Ø10 - DIN 471	16	01	Estrutura - SPV	Aço ABNT 1050
			13	01	Bucha Cônica Roscada	PTFE
Peça N.	Quantidade	Denominação / Norma / Material	Peça N.	Quantidade	Denominação / Norma / Material

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

Piça N.	Quantidade	Denominação / Norma / Material
40	02	Arruela 04 - DIN 433
39	02	Parafuso M4x20 - DIN 912
38	02	Arruela de Pressão 05 - DIN 7980
37	02	Parafuso M5x25 - DIN 912
36	04	Arruela de Pressão 04 - DIN 7980
35	12	Parafuso M4x25 - DIN 912
34	12	Parafuso Fricção - Sext. Interno M4x5 - DIN 912
33	08	Parafuso M8x100 - DIN 912
32	04	Anel Elástico Ø110 - DIN 471
31	02	Rolamento Radial de Esferas - NSK / 20009
22	01	Placa de Apoio - SPV
21	01	Parafuso de Movimento - SPV
20	02	Guia - SPV
19	05	Bucha - SPV
18	01	Base de Movimentação - SPV
17	01	Apoio - SPV
16	01	Estrutura - SPV
15	01	Parafuso de Movimento - SPH
14	02	Guia - SPH
13	02	Bucha Cônica Roscada
12	01	Base de Movimentação - SPH
11	01	Base B - SPH
10	01	Base A - SPH
09	01	Porca
08	01	Parafuso de Transmissão
07	02	Guia
06	04	Bucha
05	01	Berço de Movimentação
04	02	Base

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

Piça N.	Quantidade	Denominação / Norma / Material
57	01	Corpo de Prova
56	01	Célula de Carga - Força Normal - Modelo: S-5
55	01	Célula de Carga - Força Tangencial - Modelo: GL 2
54	04	Parafuso $M4 \times 16$ - DIN 912
53	01	Parafuso $M6 \times 20$ - DIN 912
52	01	Porca $M6$ - DIN EN 24032
51	02	Arruela de Pressão $\varnothing 6$ - DIN 7980
50	01	Arruela $\varnothing 6$ - DIN 125
49	01	Parafuso Frictioneiro - Sext. Interno $M6 \times 30$ - DIN 912
48	02	Arruela $\varnothing 3$ - DIN 433
47	02	Arruela de Pressão $\varnothing 3$ - DIN 7980
46	02	Parafuso $M3 \times 16$ - DIN 912
45	02	Parafuso $M4 \times 30$ - DIN 912
44	02	Parafuso $M3 \times 20$ - DIN 912
43	02	Rolamento Radial de Esferas - 625ZZ - ABEC - 1
42	02	Porca $M5$ - DIN EN 24032
41	02	Arruela $\varnothing 5$ - DIN 125
40	10	Arruela $\varnothing 4$ - DIN 433
38	02	Arruela de Pressão $\varnothing 5$ - DIN 7980
36	06	Arruela de Pressão $\varnothing 4$ - DIN 7980
35	04	Parafuso $M4 \times 25$ - DIN 912
34	09	Parafuso Frictioneiro - Sext. Interno $M4 \times 5$ - DIN 912
30	01	Contato
29	01	Apelo - Corpo de Prova
28	01	Placa Fixadora
27	01	Suporte - Corpo de Prova
26	01	Exo
25	01	Suporte - Célula de Carga - FT
24	01	Base de Fixação
23	01	Aço ABNT 1050

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

Paga N.	Quant.	Denominação / Norma / Material	Paga N.	Quant.	Denominação / Norma / Material
57	01	Corpo de Prova	30	01	Contato
56	01	Célula de Carga - Força Normal - Modelo: S-5	29	01	Apóio - Corpo de Prova
55	01	Célula de Carga - Força Tangencial - Modelo: GL 2	28	01	Placa Fixadora
54	04	Parafuso M4x16 - DIN 912	27	01	Suporte - Corpo de Prova
53	01	Parafuso M6x20 - DIN 912	26	01	Elxo
52	01	Porca M6 - DIN EN 24032	25	01	Suporte - Célula de Carga - FT
51	02	Arruela de Pressão Ø6 - DIN 7980	24	01	Placa de Apóio - SPV
50	01	Arruela Ø6 - DIN 125	23	01	Base de Fixação
49	01	Arruela Ø3 - DIN 433	22	01	Parafuso de Movimento - SPV
48	02	Arruela de Pressão Ø3 - DIN 7980	21	01	Guia - SPV
47	02	Parafuso M3x20 - DIN 912	20	02	Base de Movimento
46	02	Parafuso M3x16 - DIN 912	19	05	Bucha - SPV
45	02	Parafuso M4x30 - DIN 912	18	01	Base de Movimento
44	02	Parafuso M3x20 - DIN 912	17	01	Apóio - SPV
43	02	Parafuso M4x25 - DIN 912	16	01	Estrutura - SPV
42	02	Parafuso M5 - DIN EN 24032	15	01	Parafuso de Movimento - SPH
41	02	Arruela Ø5 - DIN 125	14	02	Guia - SPH
40	12	Arruela Ø4 - DIN 433	13	02	Bucha Cônica Roscada
39	02	Parafuso M4x20 - DIN 912	12	01	Base de Movimento
38	04	Arruela de Pressão Ø5 - DIN 7980	11	01	Base B - SPH
37	02	Parafuso M5x25 - DIN 912	10	01	Base A - SPH
36	10	Parafuso M4x25 - DIN 912	09	01	Porca
35	16	Parafuso M4x25 - DIN 912	08	01	Parafuso de Transmissão
34	21	Parafuso Pistoneiro - Sext. Interno M4x5 - DIN 912	07	02	Guia
33	08	Parafuso M8x100 - DIN 912	06	04	Bucha
32	04	Anel Elástico Ø10 - DIN 471	05	01	Berço de Movimento
31	02	Parafuso Radial de Esferas - NSK / Z0009	04	02	Base

Tolerâncias Gerais: ± 1

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

38	01	Apoio - Mancais de Rolamento	Madeira - Revestimento: Fôrmica	
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material	
FEI		Departamento de Engenharia Mecânica	MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	
Esc. 1:2			Desenho 38	Data: 07/08/10

Tolerâncias Gerais: ± 1

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

38	01	Apoio - Mesa de Translação	Madeira - Revestimento: Fôrmica Material
Piça N.	Quantidade	Denominação/Norma	
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Esc. 1:2
			Desenho 39 Data: 07/08/10

Tolerâncias Gerais: ± 1

DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

37	01	Apoio - Servos-Controladores	Madeira - Revestimento: Fórmica
Peça N.	Quantidade	Denominação/Norma	Material
FEI Departamento de Engenharia Mecânica		MÁQUINA DE DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	Desenho 40
			Esc. 5:1 Data: 05/08/10

CIRCUITO DE COMANDO

ELABORAÇÃO E DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

CIRCUITO DE POTÊNCIA

ELABORAÇÃO E DESENHO: RONALDO CÂMARA COZZA - rcamara@fei.edu.br

FEI

Departamento de
Engenharia Mecânica

MÁQUINA DE DESGASTE
POR MICRO-ABRASÃO

Desenho 42

Data: 29/08/10

Apêndice 4

Tabela 1. Valores de S_{ens} . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N e $v = 0,11$ m/s. Corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	d [mm]	A_t [mm ²]	P [MPa]	S_{ens} [MPa.m/s]
20	2,2	0,647	0,329	1,185	0,130
		0,649	0,331	1,178	0,129
		0,784	0,336	0,808	0,089
	Média	0,693	0,332	1,057	0,116
	Desv. Pd.	0,078	0,004	0,216	0,024
	Erro	0,045	0,002	0,125	0,014
80	8,8	0,821	0,529	0,737	0,081
		0,834	0,546	0,714	0,079
		0,803	0,507	0,769	0,085
	Média	0,819	0,527	0,740	0,081
	Desv. Pd.	0,015	0,020	0,028	0,003
	Erro	0,009	0,011	0,016	0,002
180	19,8	0,918	0,662	0,589	0,065
		0,969	0,737	0,529	0,058
		0,949	0,707	0,551	0,061
	Média	0,945	0,702	0,556	0,061
	Desv. Pd.	0,025	0,038	0,030	0,003
	Erro	0,015	0,022	0,017	0,002
300	33	1,164	1,064	0,366	0,040
		1,072	0,902	0,432	0,048
		1,124	0,992	0,393	0,043
	Média	1,120	0,986	0,397	0,044
	Desv. Pd.	0,046	0,081	0,033	0,004
	Erro	0,027	0,047	0,019	0,002
420	46,2	1,190	1,112	0,351	0,039
		1,164	1,065	0,366	0,040
		1,165	1,066	0,366	0,040
	Média	1,173	1,081	0,361	0,040
	Desv. Pd.	0,015	0,027	0,009	0,001
	Erro	0,008	0,015	0,005	0,001

Tabela 2. Valores de S_{ens} . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25$ N e $v = 0,05$ m/s. Corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

t [s]	S [m]	d [mm]	A_t [mm ²]	P [MPa]	S_{ens} [MPa.m/s]
160	8	1,194	1,120	1,115	0,056
		1,286	1,298	0,962	0,048
		1,088	0,930	1,343	0,067
	Média	1,189	1,116	1,140	0,057
	Desv. Pd.	0,099	0,184	0,192	0,010
	Erro	0,057	0,106	0,111	0,006
300	15	1,338	1,406	0,888	0,044
		1,130	1,002	1,247	0,062
		1,452	1,656	0,754	0,038
		1,209	1,148	1,088	0,054
	Média	1,282	1,303	0,994	0,049
	Desv. Pd.	0,142	0,289	0,217	0,011
	Erro	0,071	0,144	0,109	0,005
400	20	1,320	1,368	0,913	0,046
		1,186	1,104	1,132	0,057
		1,436	1,619	0,771	0,039
		1,153	1,044	1,197	0,059
	Média	1,274	1,284	1,003	0,050
	Desv. Pd.	0,130	0,264	0,196	0,010
	Erro	0,065	0,132	0,098	0,005
500	25	1,387	1,512	0,826	0,041
		1,383	1,502	0,832	0,042
		1,364	1,462	0,854	0,043
		1,376	1,487	0,840	0,042
	Média	1,378	1,491	0,838	0,042
	Desv. Pd.	0,010	0,022	0,012	0,001
	Erro	0,005	0,011	0,006	0,000
700	35	1,522	1,820	0,686	0,034
		1,592	1,991	0,627	0,031
		1,472	1,702	0,734	0,037
		1,470	1,698	0,736	0,037
	Média	1,514	1,803	0,696	0,035
	Desv. Pd.	0,057	0,138	0,051	0,003
	Erro	0,029	0,069	0,026	0,001
800	40	1,467	1,691	0,739	0,037
		1,542	1,867	0,669	0,033
		1,636	2,101	0,594	0,029
		1,594	1,995	0,626	0,031
	Média	1,590	1,988	0,630	0,033
	Desv. Pd.	0,047	0,117	0,037	0,003
	Erro	0,023	0,059	0,019	0,002

Tabela 3. Valores de S_{ens} . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N e $v = 0,11$ m/s. Corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	d [mm]	A_t [mm ²]	P [MPa]	S_{ens} [MPa.m/s]
20	2,2	0,768	0,463	0,842	0,093
		0,778	0,476	0,819	0,090
		0,784	0,475	0,808	0,089
	Média	0,777	0,471	0,823	0,090
	Desv. Pd.	0,008	0,007	0,018	0,002
	Erro	0,005	0,004	0,010	0,001
80	8,8	0,992	0,773	0,504	0,056
		0,995	0,778	0,501	0,055
		0,996	0,779	0,500	0,055
	Média	0,994	0,777	0,502	0,055
	Desv. Pd.	0,002	0,003	0,002	0,000
	Erro	0,001	0,002	0,001	0,000
180	19,8	1,136	1,014	0,384	0,042
		1,172	1,079	0,361	0,039
		1,158	1,053	0,370	0,041
	Média	1,155	1,049	0,372	0,041
	Desv. Pd.	0,018	0,033	0,012	0,001
	Erro	0,010	0,019	0,007	0,001
300	33	1,278	1,283	0,304	0,033
		1,294	1,315	0,296	0,033
		1,310	1,348	0,289	0,032
	Média	1,294	1,315	0,296	0,033
	Desv. Pd.	0,016	0,032	0,007	0,001
	Erro	0,009	0,019	0,004	0,001
420	46,2	1,396	1,531	0,255	0,028
		1,432	1,611	0,242	0,027
		1,380	1,496	0,261	0,029
	Média	1,403	1,546	0,252	0,028
	Desv. Pd.	0,027	0,059	0,010	0,001
	Erro	0,015	0,034	0,005	0,001

Tabela 4. Valores de S_{ens} . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25$ N e $v = 0,05$ m/s. Corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

t [s]	S [m]	d [mm]	A_t [mm ²]	P [MPa]	S_{ens} [MPa.m/s]
160	8	0,950	0,709	1,762	0,088
		1,016	0,811	1,541	0,077
		0,923	0,669	1,868	0,093
		0,875	0,601	3,743	0,187
	Média	0,963	0,730	1,724	0,111
	Desv. Pd.	0,048	0,073	0,167	0,051
	Erro	0,028	0,043	0,096	0,025
300	15	1,372	1,478	0,845	0,042
		1,298	1,323	0,944	0,047
		1,336	1,401	0,892	0,045
	Média	1,335	1,401	0,894	0,045
	Desv. Pd.	0,037	0,078	0,050	0,002
	Erro	0,021	0,045	0,029	0,001
400	20	1,429	1,604	0,779	0,039
		1,393	1,523	0,820	0,041
		1,336	1,401	0,892	0,046
		1,329	1,387	0,901	0,045
	Média	1,372	1,479	0,848	0,042
	Desv. Pd.	0,048	0,103	0,058	0,003
	Erro	0,028	0,060	0,034	0,002
500	25	1,469	1,696	0,736	0,037
		1,411	1,563	0,799	0,040
		1,351	1,433	0,872	0,044
		1,382	1,501	0,832	0,042
	Média	1,403	1,548	0,810	0,040
	Desv. Pd.	0,050	0,112	0,057	0,003
	Erro	0,029	0,065	0,033	0,001
700	35	1,465	1,686	0,741	0,037
		1,476	1,711	0,730	0,036
		1,449	1,650	0,757	0,038
		1,463	1,682	0,743	0,037
	Média	1,463	1,682	0,743	0,037
	Desv. Pd.	0,011	0,025	0,011	0,001
	Erro	0,006	0,014	0,006	0,000
800	40	1,942	2,963	0,421	0,021
		1,922	2,901	0,430	0,022
		1,823	2,610	0,478	0,024
		1,867	2,738	0,456	0,023
	Média	1,889	2,803	0,446	0,022
	Desv. Pd.	0,054	0,160	0,026	0,001
	Erro	0,031	0,092	0,015	0,001

Tabela 5. Valores de A_g/A_t . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N e $v = 0,11$ m/s. Corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	A_t [mm ²]	A_g [mm ²]	A_g/A_t
20	2,2	0,329	0,119	0,36
		0,331	0,105	0,32
		0,336	0,093	0,28
	Média	0,332	0,106	0,32
	Desv. Pd.	0,004	0,013	0,04
	Erro	0,002	0,008	0,02
80	8,8	0,529	0,140	0,26
		0,546	0,169	0,31
		0,507	0,152	0,30
	Média	0,527	0,154	0,29
	Desv. Pd.	0,020	0,015	0,02
	Erro	0,011	0,008	0,01
180	19,8	0,662	0,154	0,23
		0,737	0,178	0,24
		0,707	0,201	0,28
	Média	0,702	0,178	0,25
	Desv. Pd.	0,038	0,024	0,03
	Erro	0,022	0,014	0,02
300	33	1,064	0,121	0,11
		0,902	0,152	0,17
		0,992	0,178	0,18
	Média	0,986	0,150	0,15
	Desv. Pd.	0,081	0,029	0,04
	Erro	0,047	0,016	0,02
420	46,2	1,112	0,097	0,09
		1,065	0,205	0,19
		1,066	0,102	0,10
	Média	1,081	0,135	0,13
	Desv. Pd.	0,027	0,061	0,06
	Erro	0,016	0,035	0,03

Tabela 6. Valores de A_g/A_t . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25 \text{ N}$ e $v = 0,05 \text{ m/s}$. Corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

$t \text{ [s]}$	$S \text{ [m]}$	$A_t \text{ [mm}^2\text{]}$	$A_g \text{ [mm}^2\text{]}$	A_g/A_t
160	8	1,120	0,131	0,12
		1,298	0,072	0,06
		0,930	0,112	0,12
	Média	1,116	0,105	0,10
	Desv. Pd.	0,184	0,030	0,04
	Erro	0,106	0,017	0,02
300	15	1,406	0,261	0,19
		1,002	0,065	0,06
		1,656	0,114	0,07
		1,148	0,069	0,06
	Média	1,303	0,127	0,09
	Desv. Pd.	0,289	0,092	0,06
	Erro	0,144	0,046	0,03
400	20	1,368	0,000	0,00
		1,104	0,097	0,09
		1,619	0,449	0,28
		1,044	0,000	0,00
	Média	1,284	0,137	0,09
	Desv. Pd.	0,264	0,213	0,13
	Erro	0,132	0,107	0,07
500	25	1,512	0	0
		1,502	0	0
		1,462	0	0
		1,487	0	0
	Média	1,491	0	0
	Desv. Pd.	0,022	0	0
	Erro	0,011	0	0
700	35	1,820	0	0
		1,991	0	0
		1,702	0	0
		1,698	0	0
	Média	1,803	0	0
	Desv. Pd.	0,138	0	0
	Erro	0,069	0	0
800	40	1,691	0	0
		1,867	0	0
		2,101	0	0
		1,995	0	0
	Média	1,988	0	0
	Desv. Pd.	0,117	0	0
	Erro	0,059	0	0

Tabela 7. Valores de A_g/A_t . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N e $v = 0,11$ m/s. Corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	A_t [mm ²]	A_g [mm ²]	A_g/A_t
20	2,2	0,463	0,311	0,67
		0,476	0,341	0,72
		0,475	0,322	0,68
	Média	0,471	0,325	0,69
	Desv. Pd.	0,007	0,015	0,02
	Erro	0,004	0,009	0,01
80	8,8	0,773	0,542	0,70
		0,778	0,487	0,63
		0,779	0,501	0,64
	Média	0,777	0,510	0,66
	Desv. Pd.	0,003	0,029	0,04
	Erro	0,002	0,017	0,02
180	19,8	1,014	0	0
		1,079	0	0
		1,053	0	0
	Média	1,049	0	0
	Desv. Pd.	0,033	0	0
	Erro	0,019	0	0
300	33	1,283	0	0
		1,315	0	0
		1,348	0	0
	Média	1,315	0	0
	Desv. Pd.	0,033	0	0
	Erro	0,019	0	0
420	46,2	1,531	0	0
		1,611	0	0
		1,496	0	0
	Média	1,546	0	0
	Desv. Pd.	0,059	0	0
	Erro	0,034	0	0

Tabela 8. Valores de A_g/A_t . Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25 \text{ N}$ e $v = 0,05 \text{ m/s}$. Corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

$t \text{ [s]}$	$S \text{ [m]}$	$A_t \text{ [mm}^2\text{]}$	$A_g \text{ [mm}^2\text{]}$	A_g/A_t
160	8	0,709	0,455	0,64
		0,811	0,587	0,72
		0,669	0,000	0,00
		0,601	1,000	1,66
	Média	0,730	0,347	0,68
	Desv. Pd.	0,073	0,308	0,06
	Erro	0,042	0,178	0,04
300	15	1,478	0,611	0,41
		1,323	0,433	0,33
		1,401	0,567	0,40
	Média	1,401	0,537	0,38
	Desv. Pd.	0,078	0,093	0,05
	Erro	0,045	0,054	0,03
400	20	1,604	0,226	0,14
		1,523	0,289	0,19
		1,401	0,488	0,35
		1,387	0,339	0,24
	Média	1,479	0,336	0,23
	Desv. Pd.	0,103	0,112	0,09
	Erro	0,060	0,064	0,05
500	25	1,696	0,255	0,15
		1,563	0,412	0,24
		1,433	0,338	0,20
		1,501	0,412	0,24
	Média	1,548	0,354	0,21
	Desv. Pd.	0,112	0,075	0,04
	Erro	0,065	0,043	0,03
700	35	1,686	0	0
		1,711	0	0
		1,650	0	0
		1,682	0	0
	Média	1,682	0	0
	Desv. Pd.	0,025	0	0
	Erro	0,014	0	0
800	40	2,963	0	0
		2,901	0	0
		2,610	0	0
		2,738	0	0
	Média	2,803	0	0
	Desv. Pd.	0,160	0	0
	Erro	0,092	0	0

Tabela 9. Evolução do volume de desgaste em função da pressão. Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N, corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	V [mm ³]	P [MPa]
20	2,2	0,000678	1,185
		0,000687	1,178
		0,001460	0,808
	Média	0,000942	1,057
	Desv. Pd.	0,000449	0,216
	Erro	0,000259	0,125
80	8,8	0,001753	0,737
		0,001868	0,714
		0,001611	0,769
	Média	0,001744	0,740
	Desv. Pd.	0,000129	0,028
	Erro	0,000074	0,016
180	19,8	0,002746	0,589
		0,003403	0,529
		0,003132	0,551
	Média	0,003094	0,556
	Desv. Pd.	0,000330	0,030
	Erro	0,000191	0,017
300	33	0,007094	0,366
		0,005098	0,432
		0,006166	0,393
	Média	0,006119	0,397
	Desv. Pd.	0,000999	0,033
	Erro	0,000577	0,019
420	46,2	0,007748	0,351
		0,007107	0,366
		0,007120	0,366
	Média	0,007325	0,361
	Desv. Pd.	0,000366	0,009
	Erro	0,000212	0,005

Tabela 10. Evolução do volume de desgaste em função da pressão. Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25$ N, corpo-de-prova de WC-Co P20 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

t [s]	S [m]	V [mm ³]	P [MPa]
160	8	0,007860	1,115
		0,010557	0,962
		0,005419	1,343
	Média	0,007945	1,140
	Desv. Pd.	0,002570	0,192
	Erro	0,001484	0,111
300	15	0,012387	0,888
		0,006291	1,247
		0,017183	0,754
		0,008258	1,088
	Média	0,011030	0,994
	Desv. Pd.	0,004825	0,217
	Erro	0,002413	0,109
400	20	0,011726	0,913
		0,007637	1,132
		0,016424	0,771
		0,006829	1,197
	Média	0,010654	1,003
	Desv. Pd.	0,004403	0,196
	Erro	0,002202	0,098
500	25	0,014325	0,826
		0,014136	0,832
		0,013393	0,854
		0,013855	0,840
	Média	0,013927	0,838
	Desv. Pd.	0,000405	0,012
	Erro	0,000203	0,006
700	35	0,020755	0,686
		0,024839	0,627
		0,018151	0,734
		0,018066	0,736
	Média	0,020453	0,696
	Desv. Pd.	0,003179	0,051
	Erro	0,001590	0,026
800	40	0,017917	0,739
		0,021841	0,669
		0,027659	0,594
		0,024939	0,626
	Média	0,024813	0,630
	Desv. Pd.	0,002911	0,037
	Erro	0,001456	0,019

Tabela 11. Evolução do volume de desgaste em função da pressão. Resultados obtidos com força normal constante de $N = 0,39$ N, corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-livre”.

t [s]	S [m]	V [mm ³]	P [MPa]
20	2,2	0,001343	0,842
		0,001420	0,819
		0,001460	0,808
	Média	0,001408	0,823
	Desv. Pd.	0,000059	0,018
	Erro	0,000034	0,010
80	8,8	0,003744	0,504
		0,003793	0,501
		0,003802	0,500
	Média	0,003780	0,502
	Desv. Pd.	0,000031	0,002
	Erro	0,000018	0,001
180	19,8	0,006443	0,384
		0,007295	0,361
		0,006948	0,370
	Média	0,006895	0,372
	Desv. Pd.	0,000429	0,012
	Erro	0,000247	0,007
300	33	0,010314	0,304
		0,010835	0,296
		0,011386	0,289
	Média	0,010845	0,296
	Desv. Pd.	0,000536	0,007
	Erro	0,000309	0,004
420	46,2	0,014687	0,255
		0,016262	0,242
		0,014023	0,261
	Média	0,014991	0,252
	Desv. Pd.	0,001150	0,010
	Erro	0,000664	0,005

Tabela 12. Evolução do volume de desgaste em função da pressão. Resultados obtidos com força normal constante de $N = 1,25$ N, corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI M2 e partículas abrasivas de SiC. Equipamento de configuração “esfera-fixa”.

t [s]	S [m]	V [mm ³]	P [MPa]
160	8	0,003150	1,762
		0,004121	1,541
		0,002804	1,868
		0,002263	3,743
	Média	0,003358	1,724
	Desv. Pd.	0,000683	0,167
	Erro	0,000394	0,096
300	15	0,013688	0,845
		0,010967	0,944
		0,012299	0,892
	Média	0,012318	0,894
	Desv. Pd.	0,001360	0,050
	Erro	0,000785	0,029
400	20	0,016121	0,779
		0,014534	0,820
		0,012299	0,892
		0,012054	0,901
	Média	0,013752	0,848
	Desv. Pd.	0,001934	0,058
	Erro	0,001116	0,034
500	25	0,018023	0,736
		0,015308	0,799
		0,012867	0,872
		0,014117	0,832
	Média	0,015079	0,810
	Desv. Pd.	0,002202	0,057
	Erro	0,001271	0,033
700	35	0,017812	0,741
		0,018344	0,730
		0,017059	0,757
		0,017727	0,743
	Média	0,017735	0,743
	Desv. Pd.	0,000527	0,011
	Erro	0,000304	0,006
800	40	0,055011	0,421
		0,052733	0,430
		0,042684	0,478
		0,046974	0,456
	Média	0,049350	0,446
	Desv. Pd.	0,005585	0,026
	Erro	0,003224	0,015

Sugestões para Trabalhos Futuros

Para pesquisas futuras, sugere-se:

- 1) Estudar a influência da temperatura sobre o coeficiente de atrito;
- 2) Estudar a influência do tamanho das partículas abrasivas sobre o coeficiente de atrito.