

LEONARDO VILLABÓN RAMOS

**CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE
ABRASÔMETRO DO TIPO RODA-DE-BORRACHA
PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE AÇOS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Engenharia

**São Paulo
2005**

OK

LEONARDO VILLABÓN RAMOS

**CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE
ABRASÔMETRO DO TIPO RODA-DE-BORRACHA
PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE AÇOS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Professor Dr. Amilton Sinatora

**São Paulo
2005**

À família Villabón

Agradecimentos

Ao orientador Professor Dr. Amilton Sinatora, pela confiança e apoio;

À empresa Aços Villares-Sidenor, nas figuras dos Engenheiros Miguel Ângelo de Carvalho e Carlos Henrique da Silva, pela bolsa de mestrado FUSP, e pelo apoio e patrocínio em projetos de pesquisa;

Ao Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde, pela disponibilidade para discussões;

Ao Prof. M. Dairo Hernán Mesa Grajales, pela ajuda incondicional;

Aos Profs. Drs. Roberto Martins de Souza e Deniol Katsuki Tanaka pelas críticas e sugestões;

À empresa Globalmag, na figura do Engenheiro Marcelo Lacarotte, pela colaboração e sugestões para a instrumentação do equipamento;

Ao IPT, setor de construção civil, pela doação da Areia Normal Brasileira, material abrasivo usado nos ensaios de desgaste;

À empresa Steel - Flux Mineiros Ltda, na figura do engenheiro André Ferrarese, pela doação da areia para fundição, material abrasivo usado nos ensaios de desgaste;

Ao Departamento de Metalurgia e de Materiais da EPUSP, pela disponibilização do uso do microscópio eletrônico de varredura;

Ao Departamento de Minas da EPUSP, pela disponibilização do equipamento de peneiramento do abrasivo e separador magnético;

Ao grupo de trabalho formado pelos graduandos: Mariana Casarini, Diego Buteler, Helder Riva Stanquini e Pedro Neves, pela colaboração nos trabalhos de pesquisa;

À senhora Silene Carneiro e o senhor Sidney Carneiro, pela disponibilidade e colaboração;

Aos colegas Colombianos, pelo interesse e ajuda mútua;

Aos colegas do Laboratório de Fenômenos de Superfície, pelo companheirismo.

Resumo

O ensaio de abrasão, tipo roda-de-borracha (norma ASTM G-65), é muito utilizado na indústria de mineração e transporte de terras, para caracterizar e hierarquizar materiais em função da sua resistência ao desgaste. Os equipamentos com essa configuração não dispõem de instrumentação que permita a aquisição, o controle e armazenamento de parâmetros do tribossistema. Neste trabalho, é descrita a instrumentação de um abrasômetro tipo roda-de-borracha, construído e calibrado conforme a norma ASTM G-65. A instrumentação permitiu o controle da força normal aplicada e da velocidade de rotação da roda, medir a temperatura na amostra e a força de atrito. O equipamento permitiu medir variações da força de atrito devido ao tipo de aço, magnitude da força normal aplicada e tamanho do abrasivo. Além disso, observou-se que a redução do tamanho do abrasivo provocou diminuição do desgaste, sendo esse efeito dependente da carga aplicada e não apenas do material ensaiado, como mostrado na literatura. Formulou-se também uma hipótese para explicar por que outros equipamentos não permitiram constatar variações na força de atrito em função do tamanho do abrasivo, da força normal e do material. Neste trabalho, constatou-se que a força de atrito dependeu significativamente do material ensaiado, do tamanho do abrasivo e da força normal devido às mudanças de mecanismos de desgaste e à degradação do abrasivo que ocorrem durante o ensaio.

Abstract

The rubber wheel abrasion test (ASTM standard G65) is widely used in mining industry to characterize and rank materials as a function of wear resistance. Nevertheless, equipments available for this purpose don't have yet the appropriated instrumentation to acquisition, controlling and recording of the tribosystem parameters. In this work, the instrumentation of a rubber wheel abrasion wear tester is describes, which was developed and calibrated following the ASTM standard G65. Control of normal load and rotational speed, and measurements of specimen temperature and friction force were accomplished by means of this instrumentation. The tester allowed the measurement of friction force variations as a function of type of steel, normal force magnitude and abrasive size. Beside the type of material, as shown in the literature, the decreasing in wear with the reduction in abrasive size also depended on applied load. A hypothesis was formulated to explain why other equipments do not detect friction force variations, as a function of abrasive size, normal load and type of material. In this work, it was verified that friction force depended strongly on tested material, abrasive size and normal force due to changes in wear mechanisms and abrasive degradation, which occur during the test.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1- Introdução | 1 |
| 1.1- Importância do tema | 1 |
| 1.2- Conteúdo | 2 |
| 2- Revisão bibliográfica | 3 |
| 2.1- Definições e terminologia..... | 3 |
| 2.1.1- Tribossistema | 3 |
| 2.1.2- Desgaste | 4 |
| 2.1.3- Desgaste abrasivo..... | 4 |
| 2.1.4- Mecanismos de desgaste abrasivo..... | 4 |
| 2.1.4.1- Mecanismos de danos | 4 |
| Microsulcamento..... | 4 |
| Formação de proa..... | 4 |
| 2.1.4.2- Mecanismos de remoção de material..... | 5 |
| Mecanismos de remoção em materiais dúcteis..... | 5 |
| Mecanismos de remoção em materiais frágeis..... | 6 |
| 2.1.5- Classificação do desgaste abrasivo..... | 6 |
| 2.2- Abrasômetro tipo roda-de-borracha | 6 |
| 2.2.1- Abrasômetro tipo roda-de-borracha (norma ASTM G-65) | 7 |
| 2.2.2- Abrasômetro tipo roda-de-borracha (Stevenson; Hutchings, 1996).8 | |
| 2.2.3- Variáveis que afetam o desgaste abrasivo em abrasômetro tipo roda-de-borracha..... | 8 |
| 2.2.3.1- Influência do tamanho da partícula | 9 |
| 2.2.4- Efeito da carga aplicada em ensaios a dois e três corpos..... | 12 |
| 2.2.5- Efeito da velocidade em ensaios em abrasômetro roda-de-borracha | 14 |
| 2.2.6- Efeito da carga e distância percorrida na temperatura do corpo-de- prova | 14 |
| 2.3- Variáveis que afetam o atrito na abrasão | 15 |
| 2.4- Resumo e conclusões da revisão bibliográfica | 16 |
| 3- Objetivos..... | 17 |
| 4- Materiais e métodos | 18 |
| 4.1- Construção do abrasômetro..... | 18 |
| 4.1.1- Sistema mecânico | 18 |
| 4.1.2- Sistema instrumentado..... | 21 |
| 4.2- Procedimentos dos ensaios de desgaste. | 25 |
| 4.2.1- Sistema mecânico | 26 |
| 4.2.2- Sistema instrumentado..... | 26 |
| 4.3- Abrasivo | 27 |
| 4.4- Roda recoberta por borracha | 29 |
| 4.5- Corpos-de-prova..... | 30 |
| 4.5.1- Aço AISI 1004 | 31 |

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| 4.5.2- | Aço AISI D2 | 32 |
| 4.6- | Ensaio de desgaste | 33 |
| 5- | Resultados e discussão | 34 |
| 5.1- | Avaliação dos sistemas mecânico e instrumentado | 34 |
| 5.1.1- | Comportamento dos sinais fornecidos pelo sistema de aquisição | 34 |
| 5.1.2- | Ensaio realizado com o sistema mecânico..... | 35 |
| 5.1.3- | Ensaio realizado com o sistema instrumentado | 36 |
| 5.1.4- | Discussão dos resultados dos ensaios com sistemas mecânico e instrumentado..... | 37 |
| 5.2- | Evolução do desgaste em função do tempo de ensaio | 39 |
| 5.2.1- | Ensaio de desgaste abrasivo para o estudo dos regimes de desgaste no aço AISI 1004 | 39 |
| 5.2.2- | Ensaio de desgaste abrasivo para o estudo dos regimes de desgaste no aço AISI D2 | 40 |
| 5.3- | Desgaste | 41 |
| 5.3.1- | Aço AISI 1004 | 42 |
| 5.3.2- | Aço AISI D2 | 43 |
| 5.4- | Coefficiente de atrito..... | 45 |
| 5.4.1- | Aço AISI 1004 | 45 |
| 5.4.2- | Aço AISI D2 | 47 |
| 5.5- | Discussão do desgaste..... | 49 |
| 5.5.1- | Efeito da carga no desgaste do aço AISI 1004 | 50 |
| 5.5.2- | Efeito do tamanho de grão no desgaste do aço AISI 1004..... | 50 |
| 5.5.3- | Efeito da carga no desgaste do aço AISI D2..... | 57 |
| 5.5.4- | Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste do aço AISI D2..... | 57 |
| 5.6- | Discussão do coeficiente de atrito | 60 |
| 5.6.1- | Efeito da carga..... | 60 |
| 5.6.2- | Efeito do material | 63 |
| 5.6.3- | Tamanho de grão abrasivo | 63 |
| 6- | Conclusões..... | 66 |
| 7- | Sugestões para trabalhos futuros | 67 |
| Anexo A- | Classificação do desgaste abrasivo | 69 |
| Anexo B- | Especificações da transmissão e cálculo das correias tipo V | 73 |
| Anexo C- | Procedimentos recomendados para avaliação da resistência de materiais segundo a norma ASTM G-65 | 74 |
| Anexo D- | Avaliação da máquina | 75 |
| Anexo E- | Cálculos para aplicação da força normal no sistema mecânico | 78 |
| | Referências bibliográficas | 80 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Representação esquemática dos elementos do tribossistema (Zum Gahr, 1987) | 3 |
| Figura 2.2 – Descrição geral do tribossistema (entradas e saídas). Adaptado de Zum Gahr, (1987) | 3 |
| Figura 2.3 - Mecanismos de dano (Tylczak; Oregon, 1992) | 5 |
| Figura 2.4 Mecanismo de microcorte (Tylczak; Oregon, 1992) | 5 |
| Figura 2.5 - Esquemática dos mecanismos de desgaste por desgaste abrasivo (Tylczak; Oregon, 1992)..... | 6 |
| Figura 2.6 - Diagrama esquemático do abrasômetro tipo roda-de-borracha | 7 |
| Figura 2.7 - Diagrama do abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha desenvolvido por Stevenson; Hutchings (1996)..... | 8 |
| Figura 2.8 - Taxas de desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo, carga de 2 kg e velocidade de 0,5 m/s (Nathan; Jones, 1966)..... | 9 |
| Figura 2.9 - Taxas de desgaste com o tamanho do abrasivo, para condições de abrasão a dois e três corpos. Aço AISI 1020 (Misra; Finnie, 1981)..... | 10 |
| Figura 2.10 - Dureza em função da carga aplicada (Pintaúde; Tanaka; Sinatora, 2001) | 11 |
| Figura 2.11 – Representação esquemática da carga aplicada versus profundidade de penetração do penetrador (Oliver; Pharr, 1992)..... | 11 |
| Figura 2.12 - Efeito da carga na taxa de desgaste abrasivo de aço AISI 1020 e abrasivo SiC, 250 μ m , em ensaios a dois e três corpos (Misra; Finnie, 1981) | 13 |
| Figura 2.13 - Efeito da carga na taxa de desgaste para aço AISI 1020, ensaio em abrasômetro tipo roda-de-borracha (Stevenson; Hutchings, 1996)..... | 13 |
| Figura 2.14 - Efeito da carga e a distância percorrida na temperatura do corpo-de-prova. Abrasivo sílica com tamanho de grão malha 28/35 (Haworth, 1948) | 14 |
| Figura 4.1 - Representação esquemática do abrasômetro tipo roda-de-borracha segundo a norma ASTM G-65 (sem tolerâncias, medidas em mm) | 19 |
| Figura 4.2 - Sistema duplo de transmissão (Motor-redutor e Polia – correia) . | 20 |
| Figura 4.3 - Máquina de desgaste abrasivo a três corpos, tipo de roda-de-borracha | 21 |
| Figura 4.4 - Diagrama de fluxo da instrumentação do abrasômetro | 21 |

- Figura 4.5 - Célula de carga tipo A-50 fabricada pela Alfa instrumentos. (especificações dimensionais no site www.alfainstrumentos.com.br) 23
- Figura 4.6 - Abrasômetro tipo roda-de-borracha, mostrando: A – disco de borracha; B e C – células de carga normal e tangencial; D e E: porta-amostras dos sistemas mecânico e instrumentado; F – Braço para ensaios mecânicos; G – termopar; H – bico alimentador do abrasivo; e I – exaustor de poeira 25
- Figura 4.7 - Abrasivo ANB 50 usado nos ensaios de desgaste, mostrando grãos alongados e pontudos. Foto MEV 29
- Figura 4.8 - Dimensões do disco de aço e do prato usinado para conseguir vulcanizar a borracha (dimensões em mm) 30
- Figura 4.9 - Desenho ilustrativo da geometria usada em corpos-de-prova para ensaios de desgaste a três corpos. (dimensões em mm) 31
- Figura 4.10 - Microestrutura do aço AISI 1004. (A) inclusões de óxido na superfície polida sem ataque, e (B) ferrita + inclusões. (Ataque: Nital 3 %) 32
- Figura 4.11 - Microestrutura do aço AISI D2, mostrando carbonetos na matriz martensítica, com pontos cinza de inclusões de sulfetos e pontos negros devido a fratura dos carbonetos na preparação metalográfica. (Ataque: Nital 3 %) 33
- Figura 5.1 - Variáveis adquiridas em ensaios realizados no abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha. *CN*: Força normal, *CT*: Força tangencial, *T*: Temperatura 35
- Figura 5.2 - Tribossistema mostrando o desgaste abrasivo a três corpos. (A) Corpo-de-prova, borracha e abrasivo sílica na interface. (B) Marca homogênea de desgaste do material ensaiado 38
- Figura 5.3 - Calibração dos sistemas mecânico e instrumentado 38
- Figura 5.4 - Perda de volume acumulada em função do tempo. Carga de 15 N, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004 40
- Figura 5.5 - Taxa de desgaste em função da distância percorrida. Carga de 15 N, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004 40
- Figura 5.6 - Perda de volume acumulada em função do tempo. Carga de 50 N, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2 41
- Figura 5.7 - Perda de volume acumulada em função da distância percorrida. Carga de 50 N, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2 41
- Figura 5.8 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI 1004 42
- Figura 5.9 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004 42

- Figura 5.10 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI 1004 43
- Figura 5.11 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2 43
- Figura 5.12 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI D2 44
- Figura 5.13 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI D2 44
- Figura 5.14 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI 1004..... 46
- Figura 5.15 Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004..... 46
- Figura 5.16 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI 1004 47
- Figura 5.17 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2 48
- Figura 5.18 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI D2 48
- Figura 5.19 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI D2..... 49
- Figura 5.20 - Perda de volume em função da carga normal e tipo de abrasivo para ensaios realizados com aços AISI 1004 e D2 50
- Figura 5.21 - Análise da taxa de desgaste com o tamanho do abrasivo, para condições de abrasão a três corpos. Aço AISI 1020. Adatado de Misra; Finnie (1981)..... 51
- Figura 5.22 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 100. Foto MEV 53
- Figura 5.23 - Superfície do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 50 54
- Figura 5.24 - Morfologia do abrasivo ANB 100 antes do ensaio de desgaste mostrando partículas alongadas e pontudas. Foto MEV..... 55
- Figura 5.25 - Morfologia do abrasivo ANB 100 após os ensaios de desgaste com o aço AISI 1004, mostrando partículas alongadas e pontudas. Foto MEV..... 55
- Figura 5.26 - (A) morfologia do abrasivo ANB 50 antes do ensaio de desgaste. (B) morfologia do abrasivo ANB 50 depois de ensaiado com o aço AISI 1004. Grãos alongados não uniformizados. Foto MEV 56

| | |
|--|----|
| Figura 5.27 - Morfologia do abrasivo ANB 100 após o ensaio de desgaste com o aço AISI D2 mostrando grãos arredondados e de tamanho uniformizado. Foto MEV | 58 |
| Figura 5.28 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 100. Foto MEV | 58 |
| Figura 5.29 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 50. Foto MEV | 59 |
| Figura 5.30 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e ANB 100 e aços AISI 1004 e AISI D2 | 61 |
| Figura 5.31 - Coeficiente de atrito em função da dureza de deformação medida em superfícies polidas de diferentes materiais, usando ensaio de riscamento com ponta de diamante e carga de 2 N (Zum Gahr, 1987) | 62 |
| Figura A. 1 - Configurações mecânicas do processo abrasivo. (De mello, 1989) | 70 |
| Figura A. 2 - Proposta para classificação do desgaste abrasivo (Misra; Finnie, 1980) | 71 |
| Figura A. 3 - Representação dos mecanismos de fratura das partículas (a) abrasão (tensões localizadas), (b) clivagem (forças de compressão) (c) fratura generalizada (forças de impacto) (Murilo, 1999)..... | 71 |
| Figura E. 1 - Diagrama de forças do braço de alavanca da máquina para ensaios de desgaste..... | 78 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica da Areia para fundição Steel 50/70 | 27 |
| Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica dos componentes para confecção da Areia Normal Brasileira segundo norma ABNT NBR 7214-1982 | 28 |
| Tabela 4.3 - Denominação da Areia Normal Brasileira segundo norma ABNT NBR 7214 - 1982 | 28 |
| Tabela 4.4 - Composição química dos aços usados nos ensaios de desgaste (% massa) | 30 |
| Tabela 5.1 - Ensaios de desgaste para qualificação do sistema mecânico | 36 |
| Tabela 5.2 - Ensaios de desgaste para qualificação do sistema instrumentado | 37 |
| Tabela 5.3 - Comparação percentual de desgaste entre aço AISI 1004 e aço AISI D2 como função da carga aplicada | 45 |
| Tabela 5.4 - Resultados e análise percentual da perda de volume nas diferentes condições de ensaios..... | 49 |
| Tabela 5.5 - Análise percentual da taxa de desgaste com o tamanho do abrasivo; abrasão a três corpos. Aço AISI 1020 (Misra; Finnie, 1981)..... | 51 |
| Tabela 5.6 - Resultados e análise percentual da taxa de desgaste | 52 |
| Tabela 5.7 - Resultados de coeficiente de atrito e análise percentual dos ensaios de desgaste..... | 60 |
| Tabela 5.8 - Comparação de resultados de coeficiente de atrito de Stevenson; Hutchings (1996) e deste trabalho..... | 62 |
| Tabela 5.9 - Valores médios de coeficientes de atrito. Abrasivo: vidro (Pintaúde, 2002) | 64 |
| Tabela A. 1 - Classificação por severidade proposta por Gates (1998)..... | 72 |
| Tabela C. 1 - Parâmetros de carga, velocidade rotacional e abrasão linear para os procedimentos de padronizados recomendados pela norma ASTM G-65 | 74 |
| Tabela D. 1 - Fator para estimativa do desvio padrão a partir do número de ensaios | 76 |
| Tabela D. 2 - Quantidade mínima aceitável de ensaios (n) (norma ASTM G-65) | 77 |

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI: American Iron and Steel Institute

ANB: Areia Normal Brasileira

ASTM: American Society for Testing and Materials

EDS: Espectrometria de energia dispersiva (Energy-dispersive spectrometer)

FFBAC: Ferro fundido branco de alto cromo

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A

LFS: Laboratório de Fenômenos de Superfície

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR: Norma Brasileira

USP: Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

d : Diâmetro da partícula [mm]

D : Distância entre corpo e contra-corpo [mm]

W : Taxa de desgaste: perda volumétrica por distância percorrida [mm³/mm]

W : Carga aplicada [kgf]

H : Dureza inicial do material [kgf/mm²]

$HÁ$: Dureza do abrasivo

HRC: Dureza Rockwell escala C

HV: Dureza Vickers

K : Coeficiente de desgaste

w : Largura do sulco formado

R : raio da partícula abrasiva

HU: Dureza universal

h_{max} : Profundidade máxima de penetração

mN: mili Newton

μ : Coeficiente de atrito

μm : Micrometro

rpm: Rotações por minuto

°C: graus Celsius

1- INTRODUÇÃO

1.1- Importância do tema

Na indústria mundial, uma das maiores preocupações é o desgaste¹ de equipamentos porque é a mais freqüente causa de falha do maquinário ou parte dele, ocasionando perdas por paradas inesperadas, manutenção e reposição. O desgaste apresenta-se sob diferentes tipos; sendo os mais freqüentes, segundo a norma DIN 50320: abrasivo, erosivo, por deslizamento e por fadiga de contato.

O desgaste abrasivo é um dos principais tipos de desgaste, sendo um dos mais intensos e dos mais encontrados na prática, sendo responsável por 50 % das causas de falhas das máquinas ou componentes (Eyre, 1991). Além disso, o desgaste abrasivo tem especial importância nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração, atividades de importância estratégica para países como o Brasil e a Colômbia.

Diante disso é importante a avaliação do desgaste abrasivo em laboratório para o melhor entendimento de fenômenos de desgaste e para o desenvolvimento de materiais ou equipamentos.

O abrasômetro tipo roda-de-borracha é um dos dispositivos mais antigos para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório. Ele foi responsável pela maioria dos dados de desgaste disponíveis na literatura até a década de 70 (Borik, 1972). Este equipamento foi apresentado pela primeira vez por Haworth (1948) e consiste de uma roda-de-borracha que gira em contato com a superfície do corpo-de-prova, com abrasivo na interface. Este equipamento permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado tradicionalmente na indústria de mineração; usa-se para classificar materiais quanto a sua resistência ao desgaste.

Uma limitação destes equipamentos é a impossibilidade de se medir a força de atrito durante o ensaio, o que dificulta a estimativa da energia gasta no processo de desgaste. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um abrasômetro do tipo roda-de-borracha capaz de medir a força de atrito com

¹ Desgaste assim como os termos referentes a tipos e mecanismos serão definidos no capítulo 2.

uma sensibilidade que permite avaliar o efeito do tamanho de grão do abrasivo, e do tipo de material ensaiado no coeficiente de atrito.

1.2- Conteúdo

Este trabalho de mestrado se inicia com uma revisão bibliográfica sobre desgaste abrasivo, principalmente sobre desgaste abrasivo em abrasômetro tipo roda-de-borracha. Posteriormente apresenta-se uma análise e discussão sobre o equipamento tipo roda-de-borracha descritos na literatura.

Na segunda parte, descreve-se a construção do projeto do equipamento conforme as indicações da norma ASTM G-65. Posteriormente apresenta-se a construção de um equipamento instrumentado para aplicação da força normal, capaz de adquirir dados das forças normal e tangencial, velocidade rotacional e temperatura.

Na terceira parte do trabalho apresentam-se resultados de desgaste para cargas entre 15 e 100 N, dois tamanhos de abrasivo: 150 e 300 μm , em dois materiais.

A quarta destina-se à discussão e sugestões para trabalhos futuros. Seguem-se os anexos e bibliografia.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se a seguir definições e terminologias que serão empregadas neste trabalho.

2.1- Definições e terminologia

2.1.1- Tribossistema

Tribossistema é uma descrição que busca captar os fatores intervenientes bem como as saídas de um sistema tribológico real. Baseia-se, muito provavelmente, no conceito semelhante de sistema termodinâmico. A necessidade de se empregar esta ferramenta advém do fato das propriedades tribológicas (atrito e desgaste) dependerem fortemente do sistema (Figura 2.1). Por exemplo, os valores de atrito e desgaste dependem do meio ambiente e da rigidez mecânica do sistema, entre outros (Figura 2.2). A origem desta concepção encontra-se na literatura alemã (Zum Gahr, 1987).

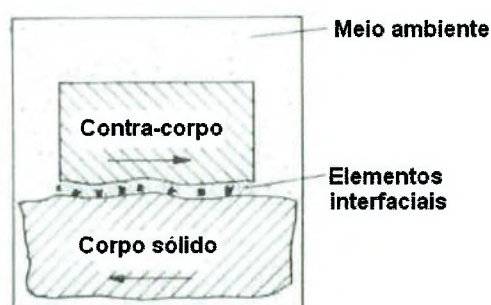


Figura 2.1 – Representação esquemática dos elementos do tribossistema (Zum Gahr, 1987)

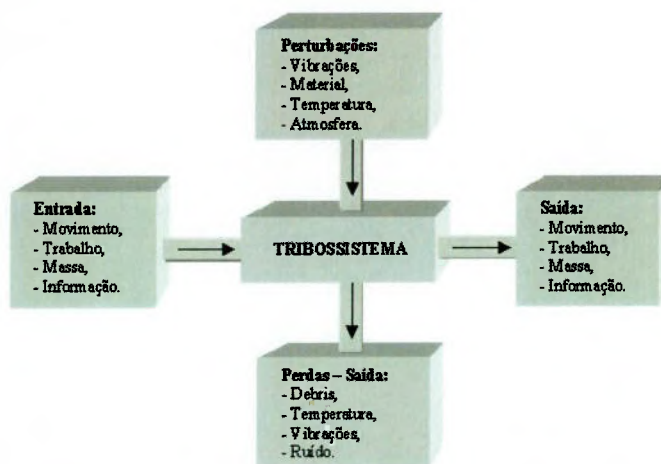


Figura 2.2 – Descrição geral do tribossistema (entradas e saídas). Adaptado de Zum Gahr, (1987)

A Figura 2.2 deixa transparecer uma visão de sistema no qual existem, aparentemente, entradas aceitáveis ou confortáveis e outras, indesejáveis ou fora de controle, classificadas como perturbações. Ela pode, por exemplo, induzir a que se procure isolar as vibrações em ensaios tribológicos em laboratório, o que pode ser correto, e desconsiderar as vibrações quando da aplicação do resultado no sistema real. Parece mais adequado considerar entradas e saídas genericamente, ou ainda, prever a possibilidade de entradas e saídas fortuitas ou caóticas.

2.1.2- Desgaste

Segundo a norma DIN 50320, desgaste é definido como a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo sólido, devido à interação mecânica, contato ou movimento relativo com contra-corpo sólido, líquido ou gasoso.

2.1.3- Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é definido pela norma ASTM G-40 como a “perda progressiva de matéria da superfície provocada por partículas soltas ou asperezas duras quando forçadas e movidas em relação à superfície de um sólido”.

2.1.4- Mecanismos de desgaste abrasivo

Os mecanismos de desgaste dividem-se em *mecanismos de dano* e *mecanismos de remoção de material*. (Tylczak; Oregon, 1992).

2.1.4.1- Mecanismos de danos

Microsulcamento

É definido como o deslocamento de material por deformação plástica para as bordas de sulcos, não resulta em perda alguma de material (Figura 2.3(A)).

Formação de proa

Mecanismo de dano de materiais dúcteis no qual a deformação plástica gera uma proa na frente da aspereza abrasiva, como observado na Figura 2.3(B). Deve ser considerado uma particularidade do microsulcamento uma vez que não há diferença fundamental entre os dois mecanismos de dano.

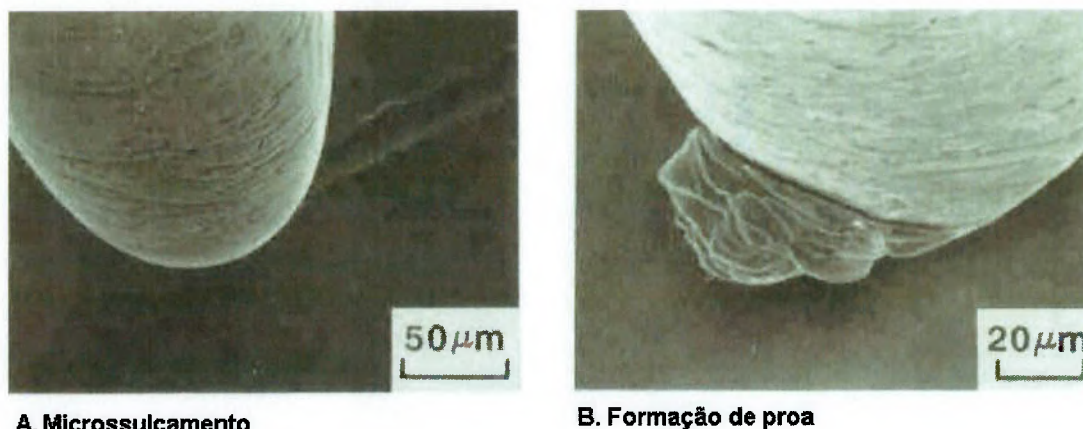


Figura 2.3 - Mecanismos de dano (Tylczak; Oregon, 1992)

2.1.4.2- Mecanismos de remoção de material

Segundo Hutchings (1992), os mecanismos de remoção de material no desgaste abrasivo podem envolver deformação plástica ou fratura frágil.

Mecanismos de remoção em materiais dúcteis

Nos materiais dúcteis os mecanismos de remoção de material são: microcorte e microfadiga, como ilustrado na Figura 2.4 e na Figura 2.5(B).

- a) Microcorte: é o mecanismo mais severo em materiais dúcteis. O processo de remoção de material se dá com formação de cavaco (Figura 2.4).



Figura 2.4 Mecanismo de microcorte (Tylczak; Oregon, 1992)

- b) Micro fadiga: ocorre devido ao acúmulo de deformações plásticas provocada pelos eventos unitários de desgaste (Figura 2.5(B)).

Mecanismos de remoção em materiais frágeis

- c) Microtrincamento: este mecanismo ocorre quando as forças aplicadas pelo abrasivo ultrapassam a resistência à fratura do material. Este mecanismo é predominante em materiais cerâmicos (Figura 2.5(A)).

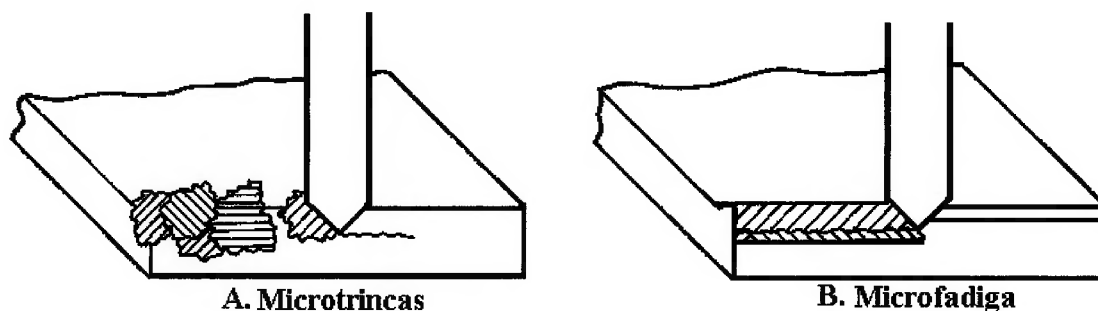


Figura 2.5 - Esquematização dos mecanismos de desgaste por desgaste abrasivo (Tylczak; Oregon, 1992).

2.1.5- Classificação do desgaste abrasivo

O objetivo de classificar o desgaste abrasivo varia. Com a classificação pode-se propor e orientar a seleção de materiais para uma determinada aplicação, pode-se objetivar descrever o fenômeno que ocorre com o agente abrasivo, pode-se tentar descrever as relações cinemáticas entre corpo, contracorpo e o abrasivo, ou a severidade da abrasão, entre outros (Avery, 1977); (Misra; Finnie, 1980); (Rigaut; Pavy, 1981). Os objetivos das classificações, bem como as classificações em si, são temas complexos e sobre os quais neste trabalho não se chegou a formar opinião. Por isto, o Anexo A resume cada uma destas classificações para contribuir com o andamento da discussão sobre classificação do desgaste abrasivo.

2.2- Abrasômetro tipo roda-de-borracha

Devido à variedade de circunstâncias em que ocorre o desgaste abrasivo bem como à complexidade do fenômeno existe uma ampla gama de dispositivos desenvolvidos para estudar este tipo de desgaste. Desenvolveram-se abrasômetros que reproduzem configurações mecânicas particulares e permitem o estudo das solicitações destes sistemas específicos. Dentre os mais usados se encontram: os abrasômetros, tipo roda-de-borracha (norma de ensaio ASTM G-65), pino-sobre-disco (norma de ensaio ASTM G-99), pequenos moinhos de bolas e mandíbulas (norma de ensaio ASTM G-81), entre outros.

Estes e suas variantes são descritas em inúmeros trabalhos sendo que um quadro geral é apresentado por Budinski (1992).

O abrasômetro roda-de-borracha consiste em uma roda revestida de elastômero girando a uma velocidade conhecida e conduzindo material abrasivo pela sua superfície contra uma amostra. Descrevem-se as duas configurações deste equipamento importantes para a análise dos resultados deste trabalho.

2.2.1- Abrasômetro tipo roda-de-borracha (norma ASTM G-65)

Neste tipo de abrasômetro o desgaste se deve a um fluxo de areia que escoava entre um disco recoberto por borracha e um corpo-de-prova metálico sobre o qual se aplica uma força normal horizontalmente mediante peso morto aplicado por um braço de alavanca. A velocidade relativa entre amostra e disco é dada pela rotação deste a 200 rpm, frequência mantida constante. A composição e granulometria da areia bem como a composição química e dureza da borracha são estabelecidas por norma. O porta amostras tem movimento livre devido à ação de um eixo pivô o que permite manter constante o ângulo de noventa graus entre a força e a superfície original da amostra. Na Figura 2.6, mostram-se os principais pontos do equipamento no qual os ensaios podem ser realizados a seco ou a umido. Os detalhes sobre o equipamento serão apresentados posteriormente ao se descrever a construção de um equipamento roda-de-borracha, segundo a norma ASTM G-65.

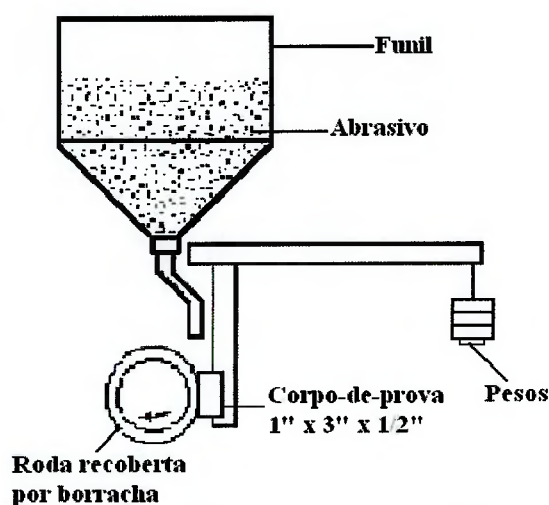


Figura 2.6 - Diagrama esquemático do abrasômetro tipo roda-de-borracha

2.2.2- Abrasômetro tipo roda-de-borracha (Stevenson; Hutchings, 1996)

Stevenson; Hutchings (1996) descreveram a construção de uma versão do abrasômetro roda-de-borracha no qual a aplicação de força normal é feita verticalmente. Possibilitando a medição da força tangencial, com o emprego de uma célula-de-carga sensível à deflexão, e da temperatura por um termopar instalado no corpo-de-prova. Na Figura 2.7, apresenta-se o abrasômetro construído por Stevenson; Hutchings (1996) com seus principais elementos constitutivos.

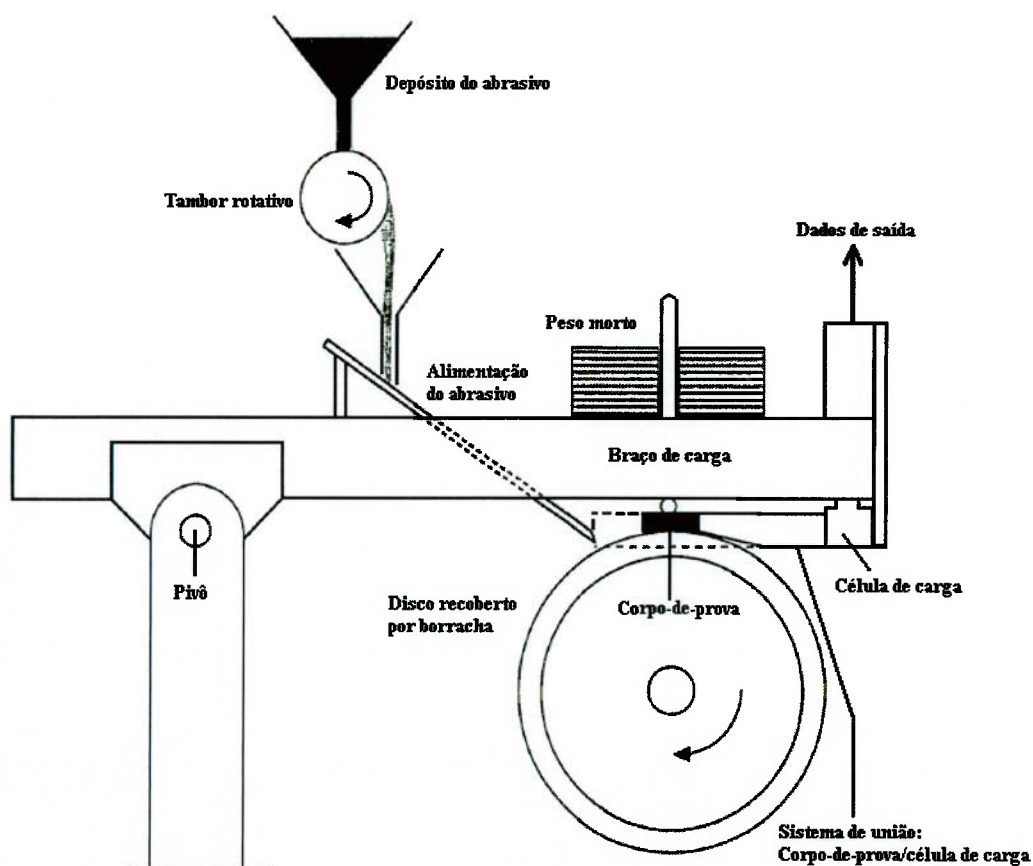


Figura 2.7 - Diagrama do abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha desenvolvido por Stevenson; Hutchings (1996)

2.2.3- Variáveis que afetam o desgaste abrasivo em abrasômetro tipo roda-de-borracha

São muitas as variáveis que afetam o desgaste abrasivo. Elas compreendem todas as possíveis variáveis de entrada do sistema como a força aplicada, velocidade relativa entre o abrasivo e o corpo no qual se analisa o desgaste, a compliância do sistema, o meio ambiente especialmente se exerce ação de corrosão sobre a amostra, a dureza e natureza da borracha, entre

outras. Estas variáveis exceto a força, foram mantidas constantes neste trabalho. Outros variáveis, como geometria, tamanho, tipo e dureza do material e do abrasivo também são muito importantes.

Detalham-se a seguir as variáveis: tamanho de grão, tempo de ensaio, carga aplicada, velocidade rotacional e tipo de material, importantes para a discussão dos resultados desta. Nas referências Avery (1977), Misra; Finnie (1980), Zum Gahr (1987), Franco (1989), Zumpano Jr. (1989), Stevenson; Hutchings (1996); Gates (1998) e Murilo (1999), encontram-se discussões mais aprofundadas sobre as variáveis que afetam o desgaste abrasivo.

2.2.3.1- Influência do tamanho da partícula

Nathan; Jones (1966), realizaram ensaios a dois corpos com abrasivo com dimensões entre 35 e 710 μm em: alumínio recozido comercialmente puro; bronze laminado a frio B.S. 36 g, cobre recozido comercialmente puro; e aço Em.8 laminado, mostraram que para tamanhos de abrasivo do que mais de 100 μm , pouco afeta a taxa de desgaste, (exceto para o alumínio). Para abrasivos menores que este valor o desgaste diminui continuamente e pronunciadamente de intensidade, como apresentado na Figura 2.8. Um aspecto curioso deste experimento é que o desgaste do bronze foi quase sempre superior ao do cobre apesar da menor dureza deste.

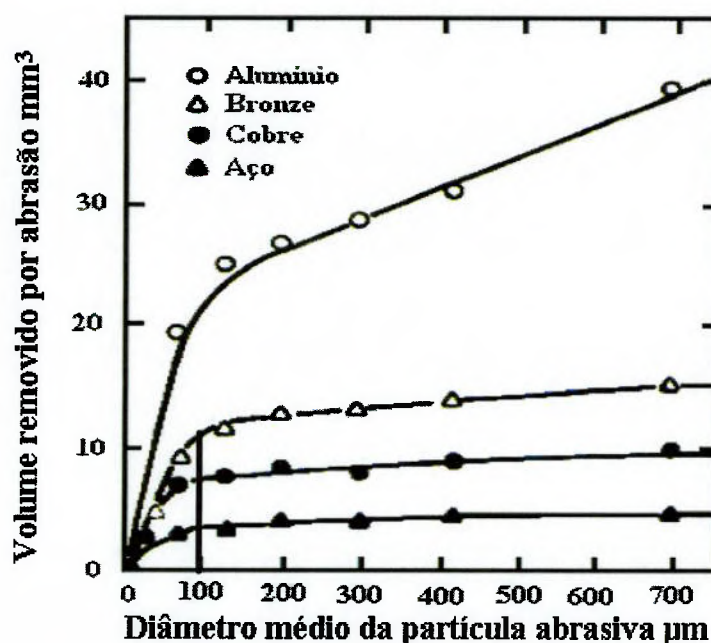


Figura 2.8 - Taxas de desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo, carga de 2 kg e velocidade de 0,5 m/s (Nathan; Jones, 1966)

Misra; Finie (1981) mostraram que para ensaios realizados em cobre quando o abrasivo tinha mais do que 100 μm , o seu tamanho afetava pouco o desgaste abrasivo nas configurações a dois e três corpos, assim como nos ensaios de erosão; mas ele não explicita que em que tipo de máquina de ensaios realizou os experimentos. Para abrasivos menores que este valor a taxa de desgaste diminui continuamente e pronunciadamente de intensidade, como mostrado na Figura 2.9.

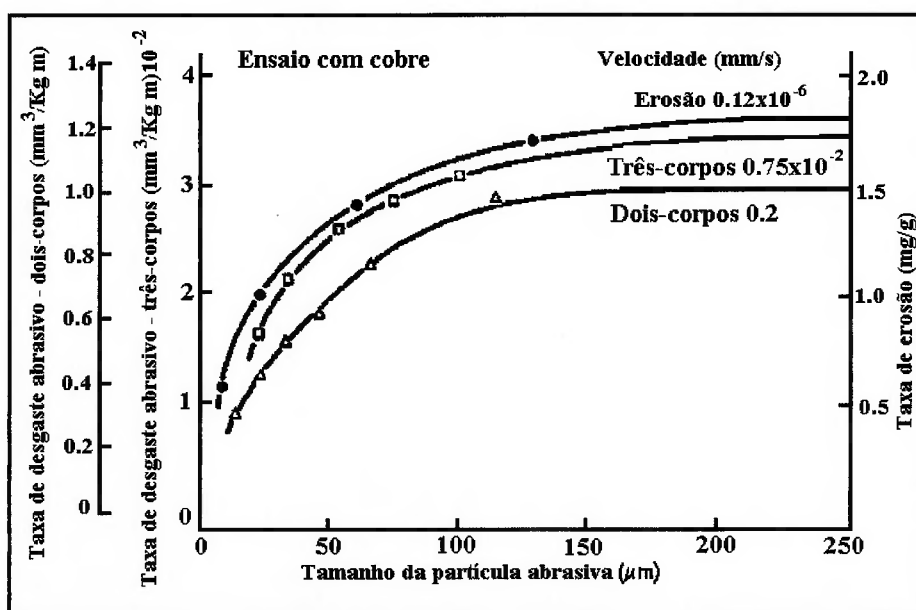


Figura 2.9 - Taxas de desgaste com o tamanho do abrasivo, para condições de abrasão a dois e três corpos. Aço AISI 1020 (Misra; Finnie, 1981)

Segundo Misra; Finnie (1981), o efeito do tamanho de grão na abrasão e erosão de metais se deve à taxa de desgaste ser influenciada pelo tamanho das regiões deformadas pelos grãos abrasivos, e à resistência mecânica que estas apresentam; uma vez que para o mesmo material, a tensão de escoamento num pequeno volume é maior do que em um volume maior. Ou seja, as regiões deformadas por abrasivos menores têm menor volume de deformação que as deformadas por abrasivos maiores, e portanto, maior dificuldade para a movimentação das discordâncias do que naquelas.

Esta explicação encontra apoio nos estudos de dureza instrumentada. Nesses estudos verificou-se que o valor medido de dureza aumenta com a diminuição da carga aplicada, conforme os resultados obtidos por Pintaúde; Tanaka; Sinatora (2001), e mostrados na Figura 2.10.

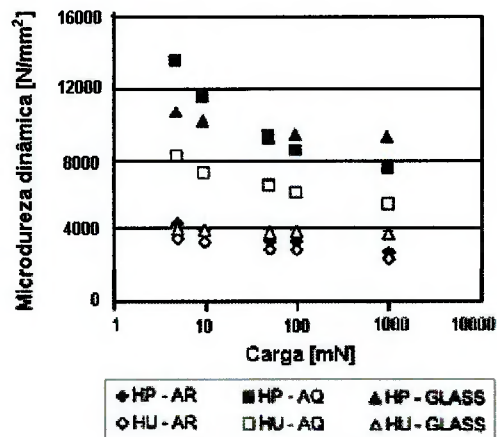


Figura 2.10 - Dureza em função da carga aplicada (Pintaúde; Tanaka; Sinatora, 2001)

Esses resultados foram obtidos em ensaios com cargas de 5, 10, 50, 100 e 1000 mN, utilizando-se amostras de aço ASTM 4340 nas condições como fornecido, temperado ao ar e temperado em óleo a 850°C. A dureza universal (HU) foi calculada em função da profundidade máxima de penetração do indentador (h_{max}), e a dureza plástica (HP), em função da profundidade de contato (h_c). h_{max} e h_c são parâmetros de curva carga *versus* deslocamento (Oliver; Pharr, 1992) mostrada na Figura 2.11.

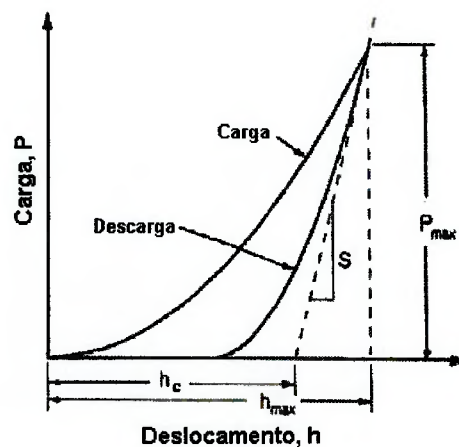


Figura 2.11 - Representação esquemática da carga aplicada versus profundidade de penetração do penetrador (Oliver; Pharr, 1992)

A explicação deste fenômeno é que para deformações em pequenos volumes de material se requer mais energia para a movimentação das discordâncias do que para volumes maiores.

Outra explicação para a diminuição da perda de massa por abrasão com a diminuição do tamanho dos abrasivos seria a de que abrasivos menores transferem menos carga por grão abrasivo dos que os abrasivos maiores; e

isto, em conseqüência leva a uma menor profundidade de penetração dos abrasivos menores, portanto, a uma menor remoção de material por grão abrasivo.

Experimentos realizados por Pintaúde; Tanaka; Sinatora (2003) mostraram que a carga por abrasivo pode ser avaliada mediante experimentos nos quais a largura do sulco devido à movimentação dos abrasivos é comparada com a diagonal da indentação de dureza feita sobre superfícies encruadas por desgaste. Este trabalho mostrou que para aço AISI 1006 a carga por grão determinada com o procedimento acima, diminuiu de $3,7 \pm 0,2$ GPa para $2,6 \pm 0,2$ GPa; e para $2,15 \pm 0,09$ GPa na medida em que a grana da lixa foi de #80 para #240 e finalmente para #600, respectivamente.

Na Figura 2.9, pode-se observar ainda que as taxas de desgaste para ensaios a três corpos são de pelo menos de uma ordem de grandeza menores que as taxas para ensaios de desgaste abrasivo a dois corpos, isto como conseqüência de que nos ensaios a três corpos as partículas abrasivas podem rolar na interface entre corpo e contra-corpo, enquanto que este rolamento é dificultado nos ensaios a dois corpos nos quais o abrasivo é solidário ao contra-corpo. Nessa última configuração, o rolamento do abrasivo seria possível no caso de descolamento do abrasivo de seu engaste ou de fratura do mesmo com conseqüente deslocamento do abrasivo fraturado para a interface entre os corpos. Por sua vez, na configuração a três corpos pode ocorrer o eventual engastamento do abrasivo ao contra-corpo e ao corpo, além da fratura e da variação da velocidade relativa do abrasivo, dificultando a generalização do efeito da configuração sobre a taxa de desgaste.

2.2.4- Efeito da carga aplicada em ensaios a dois e três corpos

Misra; Finnie (1981) mostraram que a taxa de desgaste de aço AISI 1020 por SiC com tamanho de grão de $250 \mu\text{m}$, em abrasômetro a dois corpos, cresce linearmente com a carga entre 1 e 5 kgf, como se vê na Figura 2.12. Isso foi atribuído à não mudança de micromecanismo de desgaste. Quando se estudava o mesmo aço e abrasivo num sistema a três corpos verificava-se que, para cargas menores que 2 kgf, este comportamento não era linear, e que o aumento de taxa de desgaste era tanto maior quanto maiores as forças aplicadas até 2 kgf. A variação da taxa de desgaste obtidas em ensaios a três corpos foi atribuída à mudança de micromecanismos, mudando

de microfadiga para microcorte como mecanismo predominante de desgaste na medida em que se elevava a carga de ensaio.

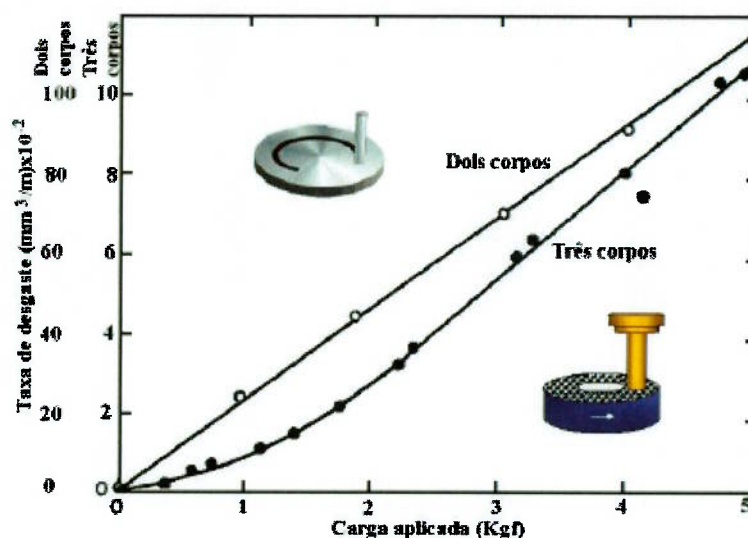


Figura 2.12 - Efeito da carga na taxa de desgaste abrasivo de aço AISI 1020 e abrasivo SiC, 250 μm , em ensaios a dois e três corpos (Misra; Finnie, 1981)

Experimentos realizados por Stevenson; Hutchings (1996) em abrasômetro roda-de-borracha mostraram que o desgaste de aços AISI 1020 por abrasivo areia Ottawa 50/70, aumentava de forma linear com o aumento da carga aplicada (Figura 2.13), repetindo os resultados de Haworth (1948) nos quais se observou o mesmo comportamento, exceto para cargas muito elevadas.

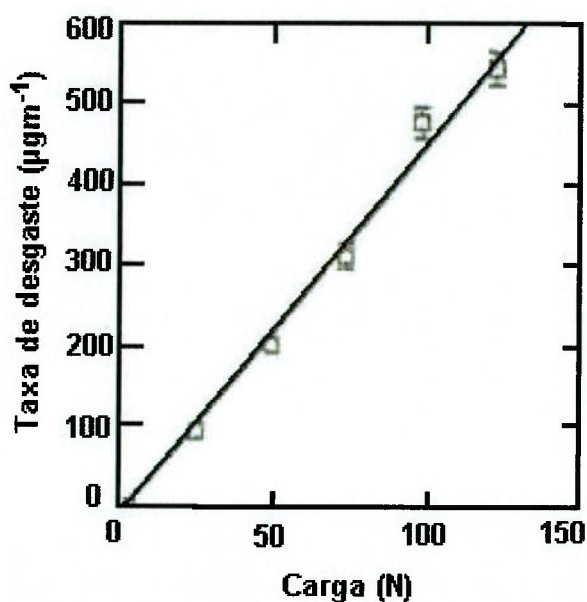


Figura 2.13 - Efeito da carga na taxa de desgaste para aço AISI 1020, ensaio em abrasômetro tipo roda-de-borracha (Stevenson; Hutchings, 1996)

2.2.5- Efeito da velocidade em ensaios em abrasômetro roda-de-borracha

Em ensaios com carga constante, (98,1 N), e variação da velocidade rotacional, Stevenson; Hutchings (1996) observaram crescentes perdas de massa entre as velocidades tangenciais de 0,1 até 0,5 m/s. Para valores superiores de velocidade e até 1 m/s, aquele autor verificou que a taxa de desgaste é decrescente, sendo explicado pelo menor aproveitamento do abrasivo na interface de ensaio. O significado deste menor aproveitamento parece estar relacionado à mudança de direção do abrasivo devido às altas velocidades de rotação.

2.2.6- Efeito da carga e distância percorrida na temperatura do corpo-de-prova

Haworth (1948), no artigo que apresenta pela primeira vez um abrasômetro tipo roda-de-borracha, mediu a temperatura pela parte traseira do corpo-de-prova em uma profundidade de 6,35 mm, aproximadamente a metade da espessura do corpo-de-prova. As condições destas medidas foram: amostra de aço AISI 1020, ensaio a seco com sílica. Para 985 rpm empregou-se carga de 10 kg. Para 250 rpm empregaram-se as cargas de 10 e 20 kg. Nota-se na Figura 2.14, que a temperatura se eleva com o aumento da carga aplicada, velocidade e tempo de ensaio. Com 900 m de ensaio, dobrando-se a carga aplicada, houve uma elevação de aproximadamente 40 % na temperatura. Quadruplicando-se a velocidade, o aumento de temperatura foi de aproximadamente duas vezes. Ou seja, a variação de velocidade tem um efeito mais do que duas vezes maior que o do aumento da força, na faixa em que estas variáveis foram estudadas.

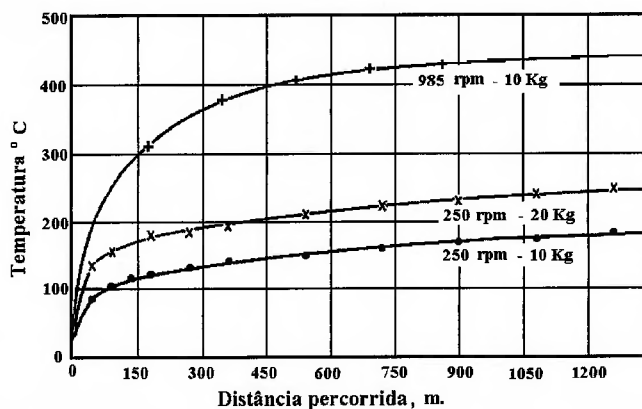


Figura 2.14 - Efeito da carga e a distância percorrida na temperatura do corpo-de-prova. Abrasivo sílica com tamanho de grão malha 28/35 (Haworth, 1948)

Observa-se na Figura 2.14, que podem ser atingidos valores de temperaturas superiores a 400 °C. Nesta faixa de temperaturas, os aços estruturais, os aços para construção mecânica e boa parte dos aços ferramenta apresentam expressiva queda de dureza com a temperatura e significativa queda de dureza por revenido. Além disso, alguns abrasivos também apresentam queda de dureza, entre eles a sílica que apresenta diminuição da dureza na medida em que aumenta a temperatura. Com estas variações de dureza dos aços e dos abrasivos é de se esperar que a interpretação de resultados provenientes destes ensaios não seja trivial. Embora desde 1941 estes resultados mostrassem a grande importância da temperatura nos resultados de desgaste a norma não considera explicitamente os efeitos de temperatura na padronização deste abrasômetro. Provavelmente por ter analisado a possibilidade destes efeitos é que Zumpano Jr.; Cornachioni; De Mello (1989) construíram um abrasômetro com refrigeração do porta amostras.

2.3- Variáveis que afetam o atrito na abrasão

Uma extensa revisão das variáveis que afetam o atrito na abrasão foi apresentada por Pintaúde (2002), Pintaúde; Sinatora (2003) e Pintaúde; Tanaka; Sinatora (2003). Os principais pontos decorrentes da análise são resumidos abaixo juntamente com as conclusões dos seus respectivos trabalhos experimentais.

1. Para desgaste abrasivo a dois corpos em regime severo os valores de coeficiente de atrito são dependentes do tamanho do abrasivo.
2. Para desgaste abrasivo a dois corpos em regime severo os valores de coeficiente de atrito diminuem com o aumento da dureza dos materiais.
3. Para desgaste abrasivo a dois corpos em regime severo o encruamento da superfície afeta os valores de coeficiente de atrito.
4. Para desgaste abrasivo a dois corpos em regime moderado os valores de coeficiente de atrito são independentes do tamanho do abrasivo.
5. Para desgaste abrasivo a dois corpos em regime moderado os valores de coeficiente de atrito são pouco afetados pela dureza dos materiais.

A determinação do coeficiente de atrito em ensaios empregando roda-de-borracha foi feita em um único trabalho devido a Stevenson; Hutchings (1996). Nesse trabalho verificou-se para aço AISI 1020 e ferro fundido branco com alto cromo que, o coeficiente de atrito era independente da carga normal (24,5 N a 122,6 N), da velocidade de deslizamento, (0,06 m/s a 0,9 m/s), dos tamanhos de grão abrasivo da sílica entre (90 μm a 150 μm), da dureza (46 a 84 Shore na escala A) e da natureza (clorobutil e poliuretano) da borracha. Em todos os ensaios a única variação do coeficiente de atrito que se observou foi ao longo do ensaio. No início de cada ensaio o coeficiente de atrito era de 0,30 e, após as primeiras 20 rotações, esta variável assumia valores entre 0,36 e 0,40 exibindo variação máxima de 5 % para ensaios de desgaste com rotações entre 0,06 e 0,9 m/s.

2.4- Resumo e conclusões da revisão bibliográfica

1. O desgaste abrasivo é o mais prejudicial a nível industrial e o abrasômetro tipo roda-de-borracha é um equipamento freqüentemente usado para classificar materiais quanto à resistência ao desgaste abrasivo.
2. Nos abrasômetro tipo roda-de-borracha padronizados pela norma ASTM G-65 não se considera a medição de cargas normais aplicadas nem das forças tangenciais resultantes do desgaste.
3. Segundo Stevenson; Hutchings (1996), o atrito medido em abrasômetro roda-de-borracha não muda para variação de carga, velocidade, tamanho do abrasivo e dureza da borracha. Uma hipótese para esta falta de correlação pode ser a rigidez do sistema empregado.

3- OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- a) Construir e avaliar um abrasômetro tipo-roda-de-borracha, semelhante ao especificado pela norma ASTM G-65.
- b) Construir um dispositivo instrumentado capaz controlar a carga normal e monitorar as cargas normal e tangencial, velocidade de rotação da roda e a temperatura da amostra.
- c) Verificar se o novo equipamento permite determinar a influência do material, da carga e do tamanho do abrasivo no coeficiente de atrito e no desgaste.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

4.1- Construção do abrasômetro

A construção do abrasômetro foi dividida em duas etapas. Numa primeira etapa seguiram-se as diretrizes apresentadas na norma ASTM G-65 construindo-se um sistema mecânico no qual a força normal é aplicada por um braço de alavanca e a velocidade de rotação do disco é controlada manualmente por meio de um inversor de frequência. Para a construção deste sistema designado como **sistema mecânico**, foram usados os componentes e procedimentos descritos no item 4.1.1.

Em seguida procedeu-se ao aperfeiçoamento do sistema mecânico construindo-se um sistema capaz de impor, medir e adquirir sinais de força normal, tangencial, velocidade de rotação e temperatura. O novo conjunto foi chamado de **sistema instrumentado**, sendo seus componentes e procedimentos construtivos descritos no item 4.1.2.

4.1.1- Sistema mecânico

A estrutura foi construída em aço AISI 1020, e as partes da máquina foram unidas mediante solda e parafusos. O motor e o sistema de transmissão de potência foram chumbados ao chão (isolados da estrutura) sobre borrachas amortecedoras, visando obter alta rigidez e baixar o nível de vibração induzida pelo acionamento.

Na Figura 4.1, apresenta-se o desenho da estrutura recomendada pela norma ASTM G-65, sendo importante ressaltar que a norma é flexível quanto às especificações da estrutura e da transmissão empregada no equipamento.

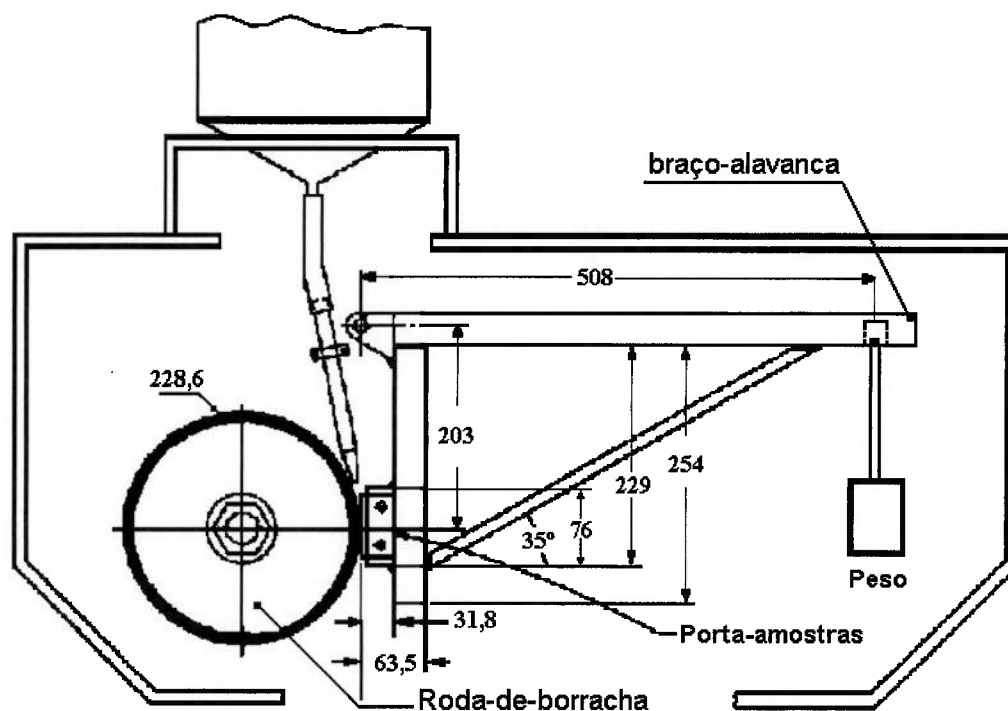


Figura 4.1 - Representação esquemática do abrasômetro tipo roda-de-borracha segundo a norma ASTM G-65 (sem tolerâncias, medidas em mm)

A seguir, apresentam-se as partes usadas para a construção do equipamento, descrevem-se detalhes adicionais apenas quando necessário.

- Motor de acionamento do disco recoberto com borracha

Motor de corrente alternada com potência de 2 HP, velocidade de rotação de 3415 rpm e frequência de 60Hz.

- Redutor de velocidade.

Capacidade de redução de 1:10.

- Polias e correias em V.

Os cálculos das transmissões são apresentados no anexo B.

- Mancais auto-alinhantes.
- Duas polias de 76,2 e 127 mm de diâmetro médio.
- Bico para saída do abrasivo:

O bico foi projetado para produzir um fluxo lamelar que forma uma cortina de areia entre a roda e o corpo-de-prova. O bico foi unido ao funil por um tubo plástico.

- Porta-amostra e braço de alavanca.

O porta-amostra foi unido mediante solda ao braço de alavanca sob o qual são pendurados os pesos para que a carga normal seja aplicada ao longo da linha diametral horizontal do disco recoberto por borracha.

A parte estrutural, depósito do abrasivo, sistema de alimentação e de aplicação da força foram construídas em aço AISI 1010 e com dimensões e geometrias indicadas pela norma ASTM G-65. No sistema foram construídas duas portas de acrílico para facilitar a troca dos corpos-de-prova.

Na Figura 4.2, apresenta-se o sistema de transmissão construído e descrito anteriormente.

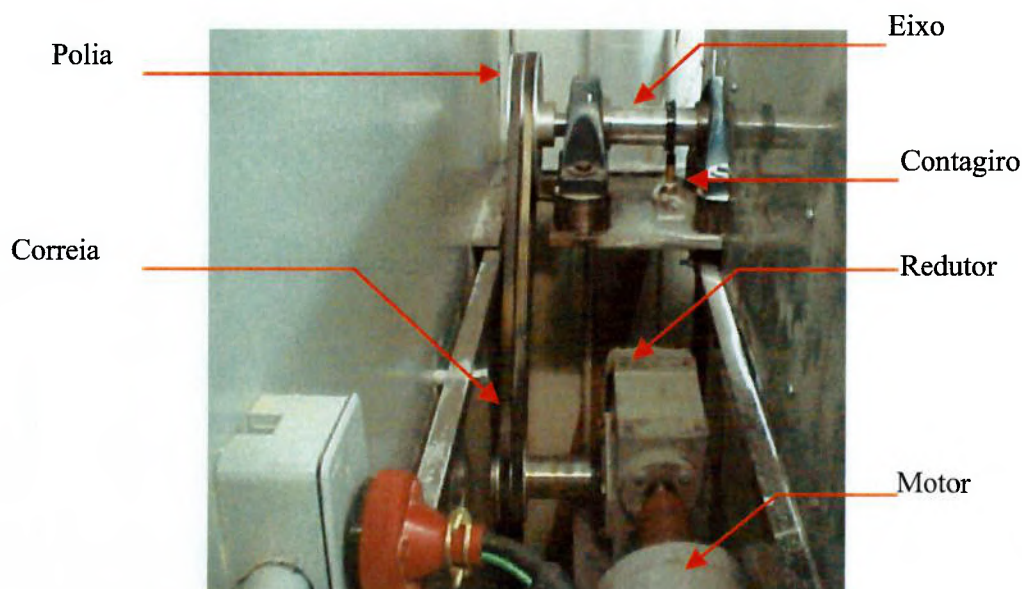


Figura 4.2 - Sistema duplo de transmissão (Motor-redutor e Polia – correia)

O sistema de aplicação da força normal consiste de um braço de alavanca de aço AISI 1020 com geometria recomendada pela norma ASTM G-65. Em sua extremidade inferior está o porta-amostra também construído do mesmo material. Nas laterais do porta-amostra há um sistema de parafusos para a fixação do corpo-de-prova. Na extremidade superior esquerda do braço usinou-se um furo que permite colocar o gancho para pendurar os pesos para aplicação da carga normal. Na parte superior direita foi alojado um rolamento que permite, mediante eixo pivô, a livre movimentação do conjunto para facilitar a aplicação da carga normal. Estes detalhes estão mostrados na Figura 4.3.

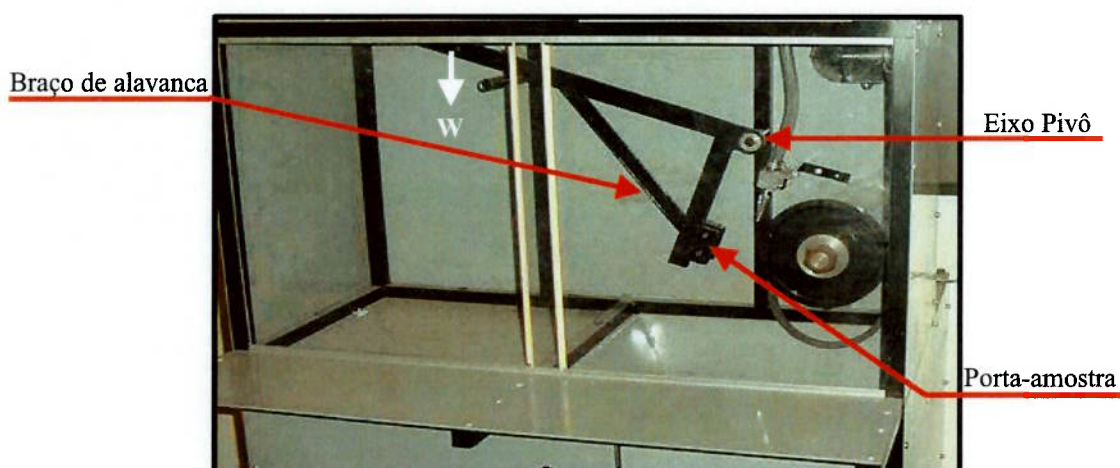


Figura 4.3 - Máquina de desgaste abrasivo a três corpos, tipo de roda-de-borracha

4.1.2- Sistema instrumentado

Implementou-se um sistema de variação das rotações mediante o uso de um inversor de frequência comandado por uma unidade de controle, computador e dispositivos periféricos. O sistema de contagens acionado por pinhão e os sistemas de medida e coleta de dados (temperatura, velocidade de rotação, força normal e força tangencial) são comandados por uma unidade de aquisição e de controle que funciona com linguagem de programação para Windows 98. Um computador capta os dados em tempo real. Na Figura 4.4 pode-se observar o diagrama de fluxo do projeto de instrumentação do abrasômetro tipo roda-de-borracha instrumentado.

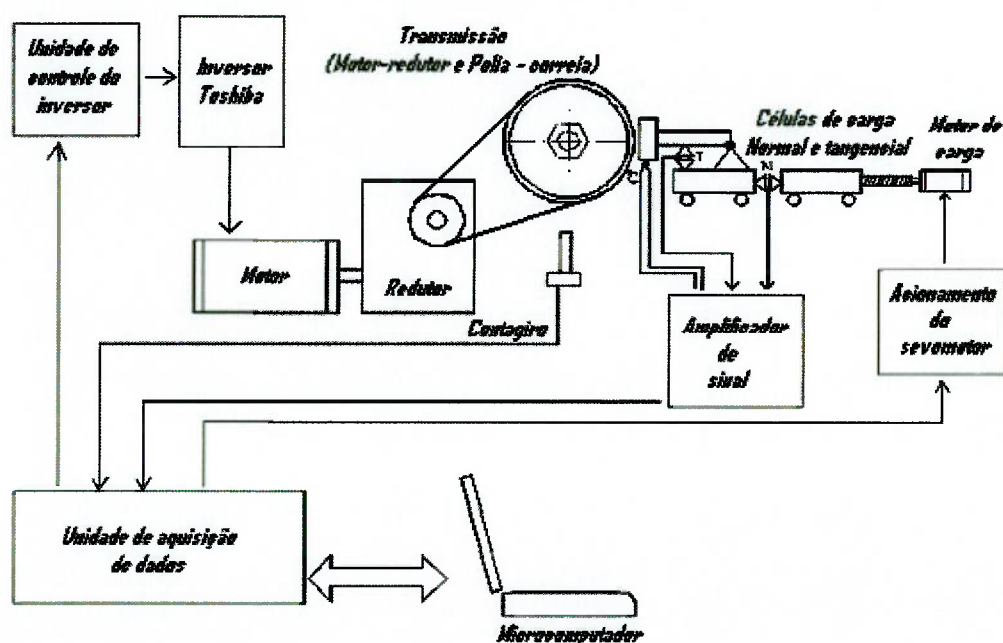


Figura 4.4 - Diagrama de fluxo da instrumentação do abrasômetro

A seguir são descritos cada um dos componentes do sistema instrumentado.

- Controle e aquisição de sinais

A unidade de coleta de dados concentra as funções de conversão analógica/digital dos sinais das células de carga, temperatura, condicionamento e leitura do sinal do contágiro bem como de envio de comandos para a unidade de controle do inversor Toshiba e para o servomotor da mesa de transferência. Um microcontrolador da Microchip PIC16F874 é o componente central desta unidade. O programa de controle ***desg up.asm*** foi desenvolvido para este microcontrolador. A escolha deste microprocessador deveu-se a sua memória EEPROM que possibilita a alteração do programa de controle a qualquer momento, seja para ajustar seu desempenho ou para corrigir algum problema.

Um micro-computador Pentium II de 200 MHz e disco rígido de 3 Gbytes é responsável pela aquisição de dados do sistema de desgaste, sendo ligado à unidade de aquisição de dados (Globalmag), através da porta paralela LPT1. Acopladores ópticos foram instalados no conector da porta paralela para garantir um isolamento galvânico entre o microcomputador e o sistema de desgaste. Esta solução foi adotada após verificar-se que um sistema de acoplamento convencional sofria interferência da corrente de rede. Todas as informações em forma digital são enviadas e recebidas da unidade de aquisição de dados.

Uma segunda unidade micro-processada foi desenvolvida para comandar o inversor de frequência Toshiba. O programa ***desg_mot.asm***, desenvolvido para o microprocessador 16F874, executa a tarefa de converter os dados para forma digital da rotação do motor que são enviadas pela unidade de aquisição de dados a cada segundo.

Foi desenvolvido o software de controle ***desg.exe*** que roda no computador e executa as tarefas de ler todos os sinais dos sensores do sistema e de ajustar os parâmetros de ensaio, enviando os comandos para todos os dispositivos do sistema, através da unidade de coleta de dados.

Um isolador óptico também está instalado na linha digital, minimizando a transferência do ruído do transmissor para a unidade de aquisição de dados.

O programa ***desg_mot.asm***, possui três funções: gerar um sinal analógico de 0 a 10V para o inversor, acionar ou desativar automaticamente o relé de *start/stop* quando receber a informação de rotação do motor e parar a roda automaticamente caso fique sem receber informação da unidade de aquisição de dados por mais de 30 segundos.

- Contagiros:

Um disco bipartido com 20 ranhuras foi instalado no eixo da roda-de-borracha. Um sensor de proximidade por efeito Hall foi usado para detectar a passagem das ranhuras provocada pela rotação do eixo. O sinal é enviado para um contador na unidade de aquisição de dados para processamento.

- Amplificador de Sinal e Células de Carga:

Dois células de cargas de 50 kg modelo A-50, (Figura 4.5), fabricadas pela Alfa instrumentos, foram empregadas para medir as cargas normal e tangencial durante os ensaios de desgaste. Estas células apresentam tensão de saída da ordem de 2 mV FE. Dois amplificadores de sinal que proporcionam estabilidade térmica foram construídos para gerar um sinal compatível com a unidade de aquisição de dados.



Figura 4.5 - Célula de carga tipo A-50 fabricada pela Alfa instrumentos. (especificações dimensionais no site www.alfainstrumentos.com.br)

- Mesa de Transferência:

Uma mesa de transferência, modelo BLM-20-AL-610, fabricada pela empresa RPL Brasil, foi adquirida para apoiar o porta-amostra e as células de carga. Sobre esta mesa um fuso de esferas recirculantes com passo de 5 mm, permite o deslocamento preciso da mesa de alumínio. Foi projetada uma outra mesa adicional deslizante e livre (sobre os mesmos fusos), para que permitisse a medida da carga normal durante o ensaio de desgaste. A célula de carga normal foi colocada entre as duas mesas, e a célula de carga tangencial foi

colocada na mesa deslizante, abaixo da articulação que suporta a amostra, como mostrado na Figura 4.6.

- Servo-motor (Globalmag):

O servo-motor e a redução foram acoplados no fuso da mesa de transferência. Este servo-motor permite que a mesa que apóia o porta-amostra e as células de carga se aproximem ou afastem da roda-de-borracha. Um sistema de realimentação permite que o servo-motor produza um torque no fuso da mesa de forma a pressionar a amostra contra a roda-de-borracha com carga constante. Este sistema de realimentação foi implementado com o programa ***desg_svm.asm*** instalado no microprocessador PIC16F84, que recebe as informações da unidade de aquisição de dados.

- Inversor (Toshiba):

O sistema de inversor, comandado pela unidade de controle, foi alojado dentro de uma caixa equipada com sistema de ventilação, para evitar aquecimento excessivo e possa, por isto, se queimar. O inversor é programável e flexível quanto ao sentido de giro, velocidade e controle, já que pode ser manual ou por computador. Aproveitando esta opção projetou-se o algoritmo de instrumentação para que ele comande o motor e controle a velocidade de rotação.

- Conjunto de exaustão de poeira e alimentação de ar:

O sistema foi projetado e construído, para evitar a contaminação do ambiente e o prejuízo à saúde, tem como objetivo a renovação do ar para efeito de conforto térmico e a exaustão de pós gerados durante o processo de desgaste.

O equipamento de exaustão se compõe de um exaustor centrífugo, tipo Scirocco de transmissão direta com potencia de 1,5 CV, duto interno tipo mangote flexível, duto externo em chapa de aço galvanizado com espessura definida pela ABNT NBR-6401, caixa filtro com unidade filtrante tipo multi-bolsas classe F-1 conforme ABNT NBR-6401, e materiais auxiliares de montagem tais como, base metálica para o motor, coxins, lona, elementos de fixação, etc.

O sistema de insuflamento se compõe de um ventilador axial com potencia de $\frac{3}{4}$ CV, filtros classe G-3 conforme ABNT NBR-6401, dutos internos

em chapa de aço galvanizado com espessura definida pela ABNT NBR-6401, 2 grelhas de insuflamento em alumínio anodizado natural com dupla deflexão e registro de vazão.

Detalhes do sistema instrumentado podem ser vistos na Figura 4.6.

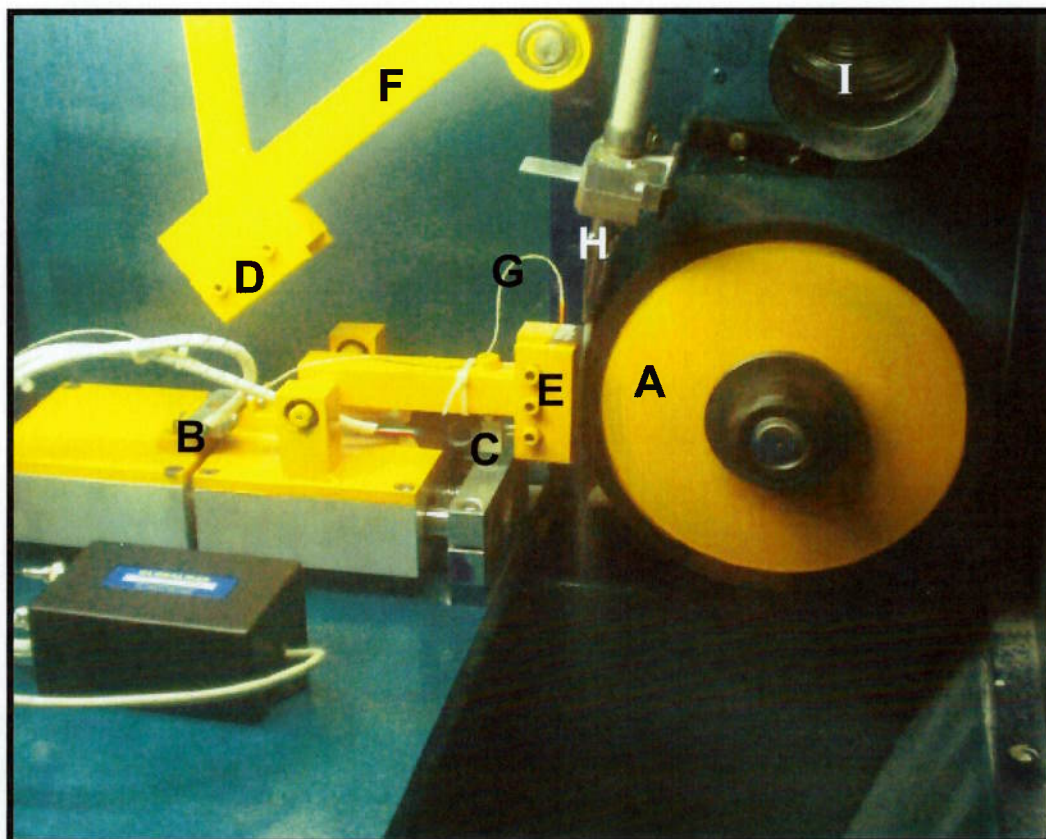


Figura 4.6 - Abrasômetro tipo roda-de-borracha, mostrando: A - disco de borracha; B e C - células de carga normal e tangencial; D e E: porta-amostras dos sistemas mecânico e instrumentado; F - Braço para ensaios mecânicos; G - termopar; H - bico alimentador do abrasivo; e I - exaustor de poeira

4.2- Procedimentos dos ensaios de desgaste.

Inicialmente foram testados os dois sistemas de ensaio, mecânico e instrumentado, para verificar que o equipamento encontra-se dentro dos requerimentos da Norma ASTM G-65. Para isto foi necessário usar o procedimento A descrito no Anexo C, recomendando uma força normal aplicada sobre a amostra de 130 N, velocidade de rotação de 200 rpm e tempo total de ensaio de 30 min.

Para os ensaios de padronização dos sistemas de aplicação de carga foi usado o aço AISI D2, com as propriedades recomendadas pela norma e descrito posteriormente no item 4.5. Os abrasivos para ensaios foram areia de

fundição #70 doada pela empresa de mineiro Steel-Flux, e denominada como Areia ST-13, e Areia Normal Brasileira (ANB) média fina fornecida pelo IPT. A análise de resultados de perda de volume foi realizada mediante as análises estatísticas apresentadas no Anexo D.

Nos itens 4.2.1 e 4.2.2 são apresentados os procedimentos para ensaios no sistema mecânico como para ensaios no sistema instrumentado.

4.2.1- Sistema mecânico

Os ensaios com o sistema mecânico foram feitos conforme a norma ASTM G-65. Antes dos ensaios os corpos-de-prova foram lavados no ultra-som por 10 min, secados com ar quente por 10 minutos, resfriados com ar frio por 10 minutos e pesados em uma balança eletrônica de precisão, marca Ohyo, modelo MJ-3000, com sensibilidade de décimo de milésimo de grama. A massa calculada foi a média aritmética de um total de 7 medições.

Depois de limpados e pesados, os corpos-de-prova foram fixados mediante parafusos no porta-amostra do sistema de braço alavanca. Nos ensaios utilizou-se uma velocidade de rotação de 200 rpm e uma carga normal de 130 N, calculada pelo procedimento descrito no Anexo E.

Depois da realização dos ensaios, foi usado o mesmo procedimento de limpeza e pesagem descrito anteriormente, com este valor calculou-se a respectiva perda de massa, subtraindo a massa final da inicial. Com o valor de densidade obteve-se o valor da perda de volume em mm^3 .

Os resultado das velocidades de rotação são a média do total de pontos adquiridos segundo a taxa de 1 Hz programada. O valor das velocidades de rotação apresentado é o valor médio de 1800 pontos para um tempo de 30 min. Também se apresentam os valores dos desvios padrão das velocidades de rotação para cada bloco de dados obtido. O valor da carga normal aplicada é aceito como o valor do peso-morto empregado em cada ensaio.

4.2.2- Sistema instrumentado

O procedimento usado para os ensaios no sistema instrumentado foi semelhante ao procedimento descrito para o sistema mecânico, o que mudou foi o sistema de aplicação da carga, a programação das variáveis por meio de computador e a aquisição dos valores das velocidades de rotação,

temperatura, forças normais e tangencias mediante um software e hardware destinados para este fim.

Depois de limpo e pesado, o corpo-de-prova foi fixado no porta-amostra por meio de parafusos, ajustando-o para que fique centralizado e nivelado de modo que o desgaste na superfície fosse uniforme.

Liga-se o micro-computador, o sistema de exaustor e insuflamento de ar e os dispositivos elétricos que conformam o equipamento, abre-se o programa e digitam-se as variáveis de entrada e parâmetros escolhidos para o ensaio, como: denominação do ensaio, carga normal, velocidade de rotação e tempo de ensaio. Inicia-se o ensaio ligando o sistema de coleta das variáveis de saída, não sem antes liberar a comporta que obstrui o fluxo de areia.

Após o tempo programado, o sistema é desligado automaticamente, e se dá o afastamento do corpo-de-prova da borracha. Manualmente obstrui-se a saída do material abrasivo, retira-se o corpo-de-prova ensaiado e se procede a limpeza e pesagem como descrito no item anterior, para sistema mecânico.

4.3- Abrasivo

Um dos materiais usados para a padronização do sistema mecânico foi areia para fundição Steel 70 (doada pela empresa Steel-Flux), denominada como areia ST-13, e que para o presente trabalho foi chamada de areia 50/70, devido à distribuição granulométrica ser próxima da classificação ASTM, e cujas especificações foram: composição $-Fe_2O_3 = 0,017 \%$, $Al_2O_3 = 0,028 \%$, $TiO_2 = 0,009 \%$, $SiO_2 = 99,80 \%$; umidade = $0,1 \%$, perda ao fogo = $0,03 \%$. A distribuição granulométrica da areia Steel 50/70 é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica da Areia para fundição Steel 50/70

| Malhas /ASTM | % Retido | % Passante Acumulado |
|--------------|----------|----------------------|
| 40 | 0,50 | 0,50 |
| 50 | 8,20 | 8,70 |
| 70 | 27,42 | 36,12 |
| 100 | 50,10 | 86,22 |
| 140 | 12,78 | 99,00 |
| 200 | 1,00 | 100,00 |

Outro tipo de areia que foi usada para padronizar, tanto o sistema mecânico quanto o sistema instrumentado foi a Areia Normal Brasileira (ANB), definida como material natural quartzoso extraído do Rio Tietê no município

de São Paulo, e distribuída pelo IPT (São Paulo). Esta areia já tem sido utilizada em trabalhos executados em abrasômetros tipo roda-de-borracha (Zumpano Jr.; Cornachioni; De Mello, 1989).

Os ensaios foram realizados com areia fina e média fina, que equivale a um tamanho de partícula de 150 e 300 μm respectivamente. Neste trabalho, adotou-se a denominação de **ANB 50 e ANB 100** conforme norma (ABNT NBR 7214).

A areia foi peneirada e em seguida secada a 100 °C até se obter valores de umidade não superiores a 5 % em peso, estando dentro do recomendado pela norma ASTM G-65 que sugere uma umidade inferior a 10 % em peso. Nas Tabelas 4.2 e 4.3 são apresentadas as especificações deste abrasivo.

Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica dos componentes para confecção da Areia Normal Brasileira segundo norma ABNT NBR 7214-1982

| Malhas /ASTM | Abertura nominal (mm) | % Retida acumulado |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|
| 8 | 2,4 | 0 |
| 10 | 2,0 | 5 +/- 5 |
| 16 | 1,2 | 25 +/- 5 |
| 30 | 0,6 | 50 +/- 5 |
| 50 | 0,3 | 75 +/- 5 |
| 100 | 0,15 | 97 +/-3 |

Tabela 4.3 - Denominação da Areia Normal Brasileira segundo norma ABNT NBR 7214 - 1982

| Material retido entre as peneiras de abertura nominal de | Denominação segundo norma | Denominação para o presente trabalho |
|---|----------------------------------|---|
| 2,4 mm e 1,2 mm | Grossa | - |
| 1,2 mm e 0,6 mm | Média grossa | - |
| 0,6 mm e 0,3 mm | Média fina | ANB 50 |
| 0,3 mm e 0,15 mm | Fina | ANB 100 |

Grãos da areia ANB foram embutidos em baquelite para realizar medições de microdureza e para caracterização em microscópio eletrônico de varredura. Após o embutimento procedeu-se à preparação da amostra com lixas de grãos 80 a 1200, e polimento com diamante de 6 a 1 μm . A microdureza Vickers do abrasivo foi determinada usando o equipamento Buehler com carga de 100 g. Para análise em microscópio eletrônico de varredura, recobriu-se a amostra com uma fina camada de ouro para assim evitar o carregamento eletromagnético.

Ensaio de microdureza realizados na superfície do abrasivo apresentando valor médio de 1350 ± 90 HV, média de 7 determinações.

Na Figura 4.7, apresentam-se os grãos abrasivos antes dos ensaios de desgaste, mostrando formas alongadas, pontudas e heterogêneas.

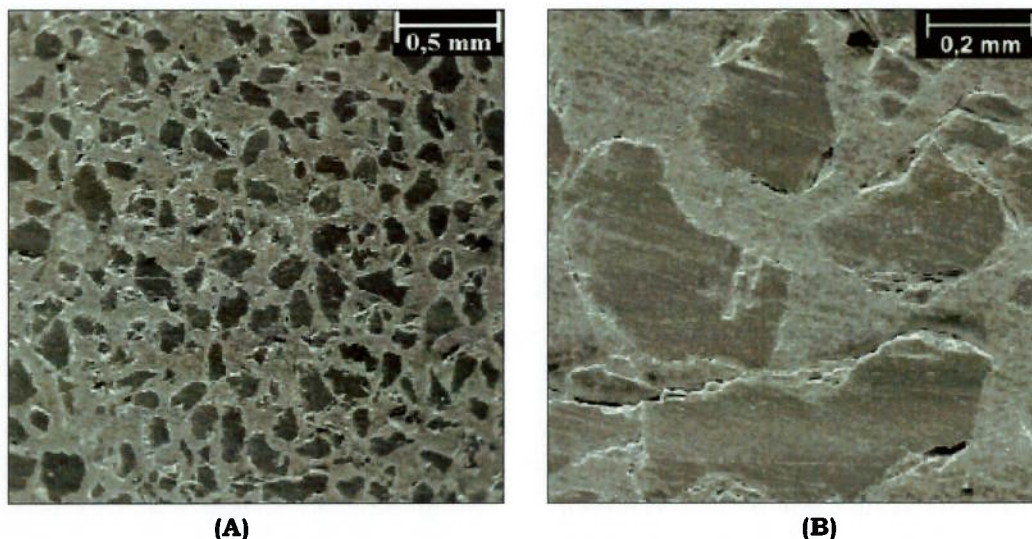


Figura 4.7 - Abrasivo ANB 50 usado nos ensaios de desgaste, mostrando grãos alongados e pontudos. Foto MEV

4.4- Roda recoberta por borracha

Foram condicionados os discos de aço AISI 1020 pela empresa *Pegi LTDA*, (Bogotá D.C, Colômbia), com as dimensões apresentadas na Figura 4.8(A). Para a fabricação da borracha usinou-se um molde com eixo central, Figura 4.8(B), de tal forma que o disco encaixe com uma tolerância forçada, de modo a se ter uma cavidade entre a periferia do disco e o diâmetro interior do prato, com espessura de 12,7 mm. Para depois fundir o elastômero solidário ao disco de aço.

O elastômero foi o clorobutil e a dureza superficial corresponde à média de 7 medições realizadas de forma perpendicular à periferia, com durômetro Shore na escala A.

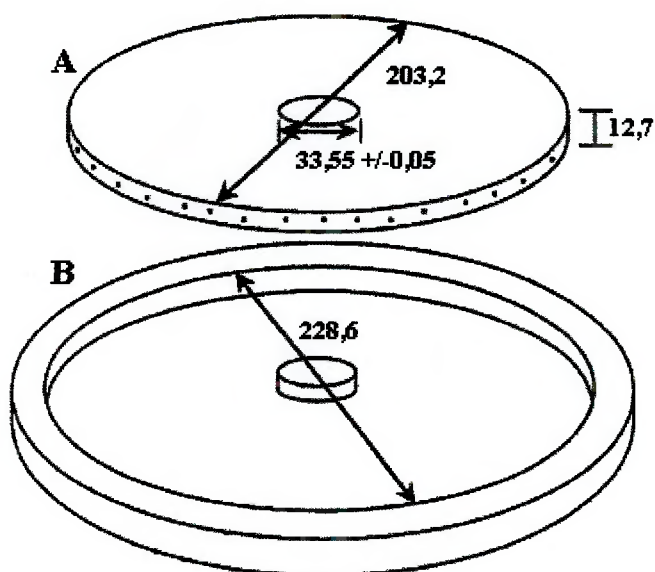


Figura 4.8 - Dimensões do disco de aço e do prato usinado para conseguir vulcanizar a borracha (dimensões em mm)

4.5- Corpos-de-prova

Foram confeccionados 24 corpos-de-prova de aço AISI D2 e de AISI 1004 com dimensões 76,2 x 25,4 x 12,7 mm, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Composição química dos aços usados nos ensaios de desgaste (% massa)

| AÇO | C | Si | Mn | P+S | Cr | Ni | Cu | Mo | N | W | Co | V | Al |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1004 | 0,042 | 0,007 | 0,024 | 0,019 | 0,016 | 0,017 | 0,007 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,001 | 0,000 | 0,089 |
| D2 | 1,645 | 0,265 | 0,167 | 0,021 | 11,665 | 0,107 | 0,207 | 0,643 | 0,023 | 0,005 | 0,033 | 0,886 | 0,016 |

O aço AISI 1004, usado para a confecção dos corpos-de-prova, foi produzido no laboratório de fundição do IPT e foi utilizado em estado bruto de fundição. Este tarugo foi posteriormente usinado e desta forma foram obtidos os corpos-de-prova com acabamento de retífica.

O aço AISI D2 usado para confecção dos corpos-de-prova foi de um lote de distribuição comercial. Foram realizados tratamentos térmicos na Combustol Ltda., da seguinte forma:

- Austenitização a 1010 °C por 25 min.
- Resfriamento ao ar
- Revenimento a 205 °C por 1 hora.

Após o tratamento térmico, foi dado um acabamento superficial pelo processo de retífica. Na Figura 4.9, é mostrado esquematicamente o corpo-de-prova usado nos ensaios de desgaste.

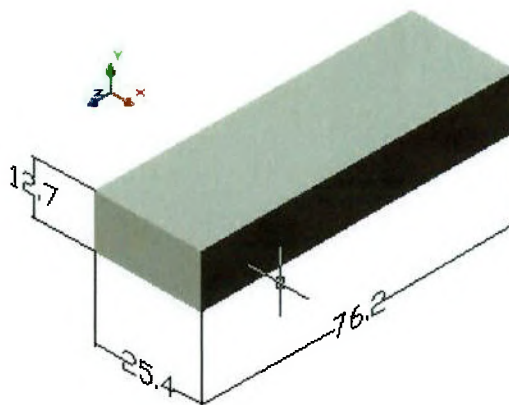


Figura 4.9 - Desenho ilustrativo da geometria usada em corpos-de-prova para ensaios de desgaste a três corpos. (dimensões em mm)

Foi realizada a análise metalográfica mediante a técnica de microscopia óptica, e medidas a dureza Vickers dos corpos-de-prova antes dos ensaios de desgaste. Para realizar as análises metalográficas foram cortados pequenos pedaços de amostras os quais foram embutidos em baquelite. Estas amostras foram preparadas mediante o processo de lixamento com lixa grana 80 até 1200. Após esta etapa, foram polidas com diamante de 6 a 1 μm . A seguir, foram feitos ataques químicos com Nital 3 % para os dois aços. As microestruturas foram observadas em microscópio óptico BX60M marca Olympus equipado com o software Qwin do analisador de imagens Leica, no qual também foram adquiridas as imagens.

Os ensaios de dureza foram realizados no durômetro Buehler com penetrador Vickers e carga de 30 N. As medidas de microdureza foram obtidas num equipamento Fischer HV100 com pré-carga de 100 g. Os valores medidos correspondem a uma média de 7 medições. No caso do aço AISI D2 os valores foram convertidos para escala HRC de modo a comparar com os valores apresentados na norma ASTM G-65. Esta conversão é feita de forma automática pelo durômetro utilizado.

4.5.1- Aço AISI 1004

Na Figura 4.10(A), apresenta-se a micrografia do aço AISI 1004, obtida por microscopia óptica, onde são observados, segundo as indicações da norma

ISO 4967, inclusões do tipo D1 e óxidos globulares (serie grossa com diâmetro de aproximadamente 12 μm). Na Figura 4.10(B), observam-se grãos de ferrita. O aço AISI 1004 tem uma dureza de 100 HV.

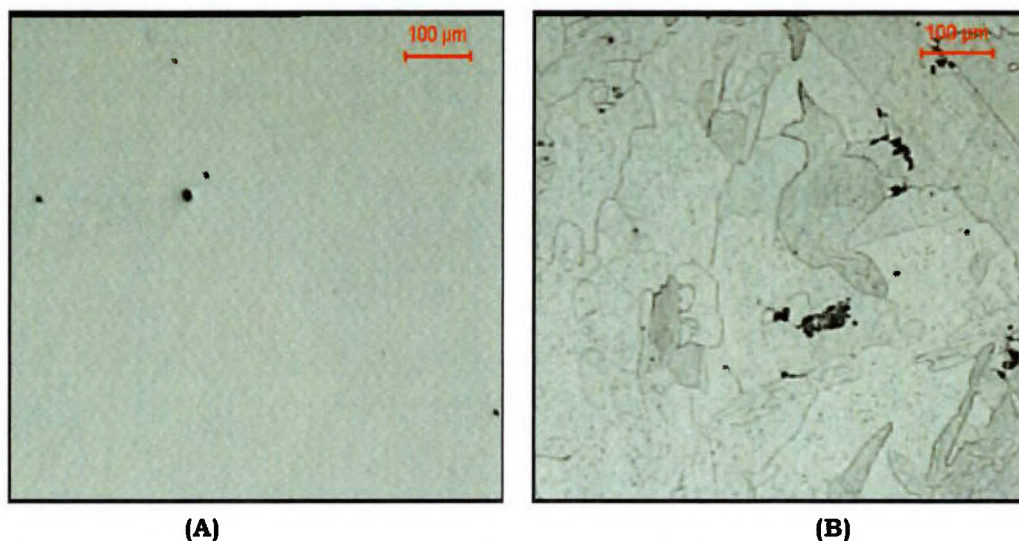


Figura 4.10 - Microestrutura do aço AISI 1004. (A) inclusões de óxido na superfície polida sem ataque, e (B) ferrita + inclusões. (Ataque: Nital 3 %)

4.5.2- Aço AISI D2

Na Figura 4.11, apresenta-se o material AISI D2 após recozimento, austenitização a 1010 $^{\circ}\text{C}$ por 25 min, resfriamento ao ar e revenimento a 205 $^{\circ}\text{C}$ por 1 hora, como descrito anteriormente.

Observa-se que os carbonetos se distribuem na microestrutura em forma de estrias geradas por ocasião do forjamento. Estes carbonetos são carbonetos eutéticos formados devido a microsegregação na solidificação e fragmentados no forjamento. Notam-se ainda inclusões de sulfetos.

A dureza do aço AISI D2 é de 690 HV (59,5 HRC), que está nas especificações da norma ASTM G-65, para testes de aprovação e confiabilidade do equipamento.

Dos anteriores resultados de dureza, tanto para o aço AISI 1004 como para o aço AISI D2, realizando a analogia do que $H_A/H > 1,2$ para que ocorra regime severo de desgaste, verificou-se que a totalidade dos ensaios foram realizados neste regime.

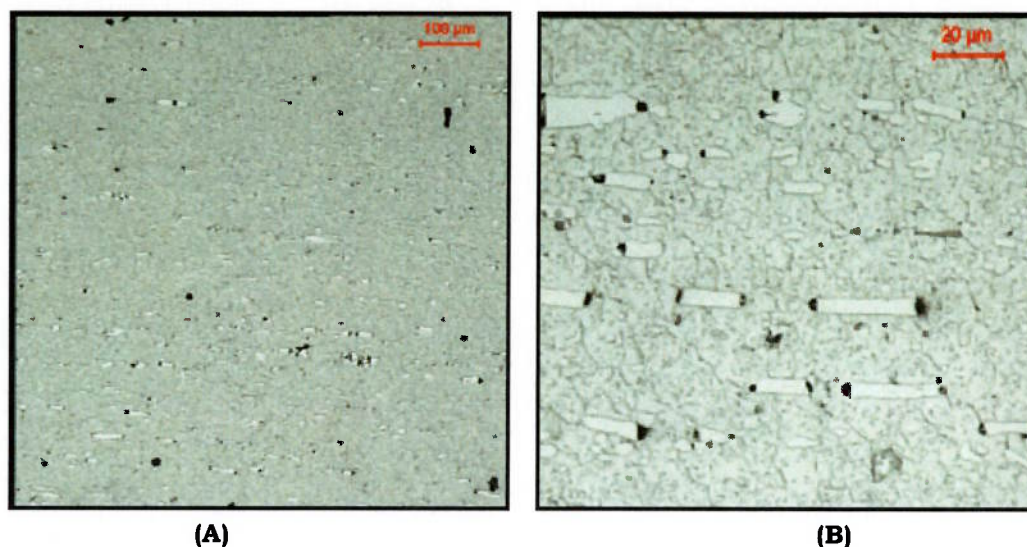


Figura 4.11 - Microestrutura do aço AISI D2, mostrando carbonetos na matriz martensítica, com pontos cinza de inclusões de sulfetos e pontos negros devido a fratura dos carbonetos na preparação metalográfica. (Ataque: Nital 3 %)

4.6- Ensaios de desgaste

Foram realizados ensaios com tempo constante de 10 minutos e cargas de 15, 30, 50 e 100 N empregando-se areias ANB 50 e 100.

Os valores de rotação, temperatura e coeficiente de atrito são, valores médios dos 480 pontos finais de cada ensaio. Este procedimento foi adotado uma vez que o sistema levava 120 segundos para se estabilizar e este período estava, com segurança, excluído do período que abarca os 480 pontos finais de cada ensaio. A perda-de-volume é o valor médio de 7 determinações. Os valores de velocidade não são apresentados visto terem sido mantidos constantes. Os valores da variação da temperatura não foram apresentados uma vez que não apresentaram variação significativa para as cargas, tempo de ensaio e velocidade de rotação empregados.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- Avaliação dos sistemas mecânico e instrumentado

Os ensaios para padronização do equipamento, tanto no sistema mecânico como no sistema instrumentado, foram feitos com aço AISI D2. Para a realização deste tipo de ensaios foram obedecidas as condições estabelecidas no procedimento A da norma ASTM G-65, Anexo C. A carga normal aplicada sobre a amostra foi de 130 N, para um tempo de ensaio de 30 min e um total de 6000 revoluções.

5.1.1- Comportamento dos sinais fornecidos pelo sistema de aquisição

Na Figura 5.1, apresentam-se as curvas de velocidade de rotação, força normal, força tangencial, e coeficiente de atrito em função do tempo. As forças normal e tangencial, e por tanto o valor do coeficiente de atrito, demoram aproximadamente 60 s para se estabilizar, isto devido à inércia do sistema e às limitações do conjunto de instrumentação. Considerou-se que era razoável manter a duração do ensaio em 30 minutos uma vez que o período necessário para estabilizar o sistema e a aquisição de dados correspondia a 1/30 do tempo total de ensaio, ou seja, 3,3 %.

Após este período o sistema se estabiliza, embora ainda com flutuação dos valores, devido aos choques dos grãos de areia contra o corpo e o contra-corpo, e à mudança contínua no contato corpo-de-prova, borracha e material abrasivo, mesmo com o sistema de retroalimentação para corrigir os valores de carga normal aplicada. Esta limitação existe devido ao tempo de resposta do sistema. Considerando a Figura 5.1, foram calculadas as variações nos valores de força normal e tangencial, valores não superiores ao 1 % do valor da variável.

Observa-se que os valores de temperatura são crescentes, devido ao atrito na interface, atingindo valores inferiores a 70 °C nos ensaios com aço AISI D2. Este valor de temperatura não diminui significativamente a dureza do AISI D2 por revenido.

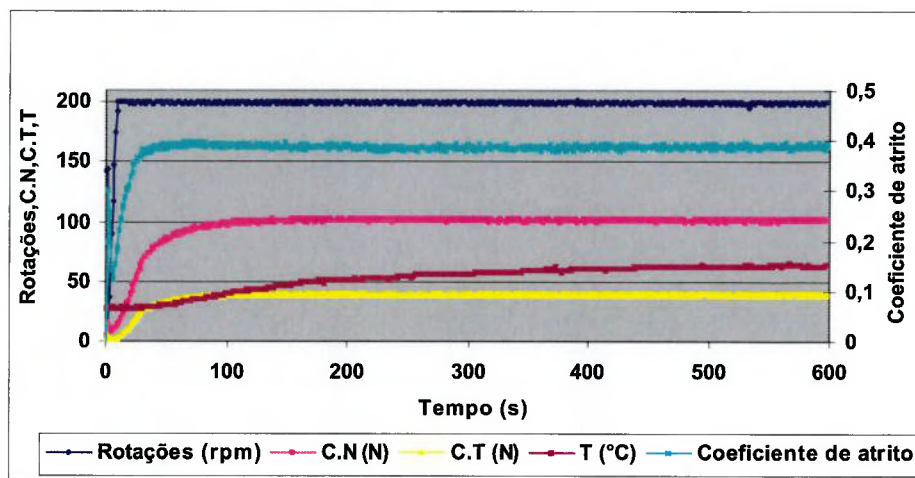


Figura 5.1 - Variáveis adquiridas em ensaios realizados no abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha. CN: Força normal, CT: Força tangencial, T: Temperatura

5.1.2- Ensaios realizados com o sistema mecânico

Os ensaios com areia Steel 70 ocasionam perda de volume de $2,8 \pm 0,45 \text{ mm}^3$, com coeficiente de variação de 18 %, portanto fora do máximo valor recomendado pela norma que é 7 %.

Avaliou-se a excentricidade do disco e o seu alinhamento em relação ao porta-amostra com relógio comparador verificando-se que ambos poderiam ser diminuídos. Isto foi feito mediante nova usinagem do eixo e nova montagem, mais cuidadosa. Realizaram-se novos ensaios, obtendo perda de volume de $6,5 \pm 0,7 \text{ mm}^3$, com coeficiente de variação de 7,7 %, ainda fora do permitido pela norma.

Atribuiu-se a amplitude do coeficiente de variação à heterogeneidade do abrasivo. Para investigar esta hipótese realizaram-se novos ensaios, agora com areia ANB padronizada pelo IPT e já empregada por Zumpano Jr.; Cornachioni; De Mello (1989). Com este procedimento obteve-se que o valor médio de perda-de-volume é de $11,5 \pm 0,45 \text{ mm}^3$, com valor de coeficiente de variação de 3,8 %, inferior aos 7 % requeridos pela norma ASTM G-65. Um resumo dos resultados pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Ensaios de desgaste para qualificação do sistema mecânico

| ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DO SISTEMA MECÂNICO DO EQUIPAMENTO DE ACORDO COM A NORMA ASTM G-65 | | | | | |
|---|--|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ensaio com areia seca | Areia Normal Brasileira 50 | Data. | 29/07/02 | | |
| Material de referência. | Aço AISI D2 | Quantidade de amostras. | 5 | | |
| | Coefficiente de variação. | 3,78 % | | | |
| Dados do corpo-de-prova. | | | | | |
| Descrição do material. | Aço AISI D2 | Diâmetro do disco (mm). | 227 | | |
| Tratamento térmico. | Temperado e revenido | Espessura do disco (mm). | 12,7 | | |
| Dureza. | 59,8 HRC | Dureza da borracha. | A60 Shore | | |
| Preparação da superfície. | Retífica | | | | |
| Ensaio Nº | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
| Carga aplicada (N) | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 |
| rotações do disco. | 198 ± 1 | 198 ± 1,5 | 198 ± 1 | 198 ± 1,5 | 198 ± 1,5 |
| Fluxo de areia (g/min) | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| Massa inicial (g) | 190,3826 | 191,3995 | 189,8185 | 189,5919 | 191,7014 |
| Massa final (g) | 190,2983 | 191,3083 | 189,7304 | 189,5085 | 191,6114 |
| Perda de massa (g) | 0,0843 | 0,0912 | 0,0881 | 0,0834 | 0,09 |
| Densidade (g/cm ³) | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| Perda de volume (mm ³). (Perda de massa/densidade)x1000 | 10,9765 | 11,875 | 11,4713 | 10,8593 | 11,7187 |
| Perda de volume ajustada (mm ³). | 11,0660 | 11,9824 | 11,5776 | 10,9696 | 11,8404 |
| Comentários. | | | | | |
| Nome da empresa | Laboratório de Fenômenos de Superfície | | | | |
| Ensaiado por | Leonardo Villabón Ramos. | | | | |

5.1.3- Ensaios realizados com o sistema instrumentado

Nos ensaios com sistema instrumentado foram mantidas as condições de ensaio recomendadas pelo procedimento A do Anexo C, alterando-se apenas o modo de aplicação da carga normal.

Os dados de perda de volume são apresentados na Tabela 5.2. Com estes resultando foi realizada a análise estatística seguido as recomendações da norma ASTM G-65, resultado em um coeficiente de variação de 4,31 %, valor inferior ao máximo valor de 7 % permitido pela mesma norma.

Tabela 5.2 - Ensaio de desgaste para qualificação do sistema instrumentado

| ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DO SISTEMA INSTRUMENTADO DO EQUIPAMENTO DE ACORDO COM A NORMA ASTM G-65 | | | | | |
|--|--|----------|----------|--------------------------|-----------|
| Ensaio com areia seca | Areia Normal Brasileira 50 | | | Data. | 15/08/02 |
| Material de referência. | Aço AISI D2 | | | Quantidade amostras. | 5 |
| | Coeficiente de variação. | | | | 4,31 % |
| Dados do corpo-de-prova. | | | | | |
| Descrição do material. | Aço AISI D2 | | | Diâmetro do disco (mm). | 226,45 |
| Tratamento térmico. | Temperado e revenido | | | Espessura do disco (mm). | 12,7 |
| Dureza. | 59,50 HRC | | | Dureza da borracha: | A60 Shore |
| Preparação da superfície. | Retífica | | | | |
| Ensaio Nº | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
| Carga aplicada (N) | 130,84 | 131,01 | 130,17 | 130,46 | 130,72 |
| Desvio Padrão | 13,93 | 7,08 | 7,02 | 4,53 | 3,23 |
| Rotações do disco. | 198 ± 1 | 198 ± 1 | 198 ± 1 | 199 ± 1,5 | 199 ± 1 |
| Força Tangencial (N) | 35 | 38 | 38 | 36 | 36 |
| Desvio Padrão | 3 | 2 | 1,5 | 1 | 0,9 |
| Fluxo de areia (g/min). | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| Massa inicial (g). | 192,8151 | 192,7010 | 192,6209 | 191,6492 | 192,3517 |
| Massa final (g). | 192,7340 | 192,6209 | 192,5324 | 191,5630 | 192,2694 |
| Perda de massa (g). | 0,0811 | 0,0801 | 0,0885 | 0,0862 | 0,0823 |
| Densidade (g/cm ³). | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 7,68 |
| Perda de volume (mm ³) (Perda de massa/densidade)x1000. | 10,5598 | 10,4296 | 11,5234 | 11,2239 | 10,7161 |
| Perda de volume ajustada (mm ³). | 10,6605 | 10,5300 | 11,6353 | 11,3354 | 10,8231 |
| Comentários. | | | | | |
| Nome da empresa | Laboratório de Fenômenos de Superfície | | | | |
| Ensaiado por | Leonardo Villabón Ramos. | | | | |

5.1.4- Discussão dos resultados dos ensaios com sistemas mecânico e instrumentado

Na Figura 5.2 apresenta em detalhe o corpo-de-prova no porta-amostras desgastando contra a borracha. Observa-se que o abrasivo forma uma cortina homogênea na interface ensaiada Figura 5.2(A), conseguindo desta forma gerar uma marca de desgaste uniforme e centralizada sobre o

corpo-de-prova (Figura 5.2(B)), evidenciando que o corpo-de-prova manteve-se paralelo à superfície de contato da borracha.

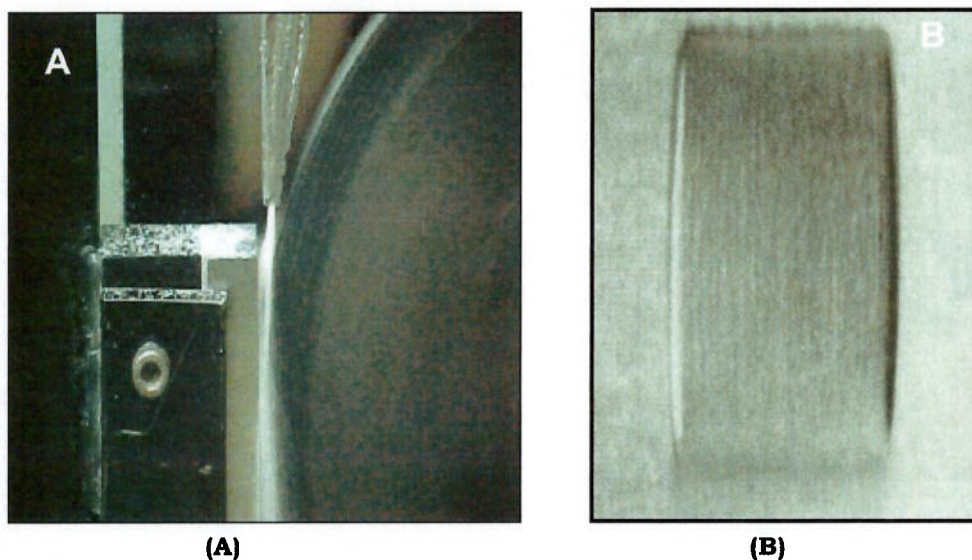


Figura 5.2 - Tribossistema mostrando o desgaste abrasivo a três corpos. (A) Corpo-de-prova, borracha e abrasivo sílica na interface. (B) Marca homogênea de desgaste do material ensaiado

Na Figura 5.3 são resumidos os valores médios dos coeficientes de variação para todos os ensaios realizados.

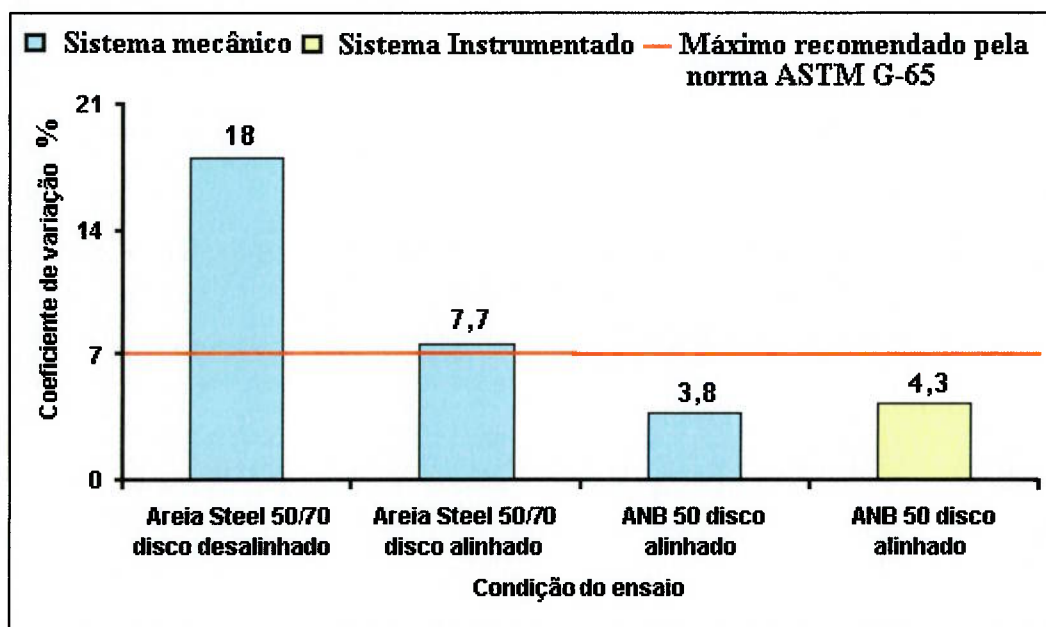


Figura 5.3 - Calibração dos sistemas mecânico e instrumentado

Verifica-se que, para os ensaios mecânicos e instrumentados realizados com o abrasivo ANB 50, o coeficiente de variação é menor que 7 %, valor

máximo recomendado pela norma ASTM G-65. Este resultado mostra que o ajuste do sistema devido à diminuição da excentricidade é tão importante quanto à qualidade do abrasivo.

Chama a atenção na bibliografia o fato de não se empregar explicitamente o procedimento recomendado na norma nem a respectiva análise estatística para padronização dos equipamentos. Também notou-se que a padronização do equipamento com materiais diferentes a os recomendados pela norma ASTM G-65 (Stevenson; Hutchings, 1996). Neste trabalho a reprodutibilidade dos resultados é considerada “boa” sem que se apresente um valor quantitativo da variabilidade do equipamento. A exceção à abordagem qualitativa é o trabalho de Zumpano Jr.; Cornachioni; De Mello, (1989), no qual os procedimentos da norma são seguidos obtendo-se coeficientes de variação dentro dos limites impostos pela norma (até 6,9 %). Diante deste único resultado relatado na literatura, os valores de 3,8 e 4,3 % para o coeficiente de variação obtidos neste trabalho podem ser considerados satisfatórios.

5.2- Evolução do desgaste em função do tempo de ensaio

Um dos procedimentos para se verificar a repetibilidade e a aplicabilidade de um ensaio de desgaste consiste em verificar se, diante do conjunto de variáveis impostas ao sistema, se os resultados de desgaste apresentam uma região de desgaste linear, indicando regime permanente de desgaste. Apresentam-se dois exemplos, um para cada material estudado neste trabalho mostrando a linearidade da perda de volume com o tempo.

5.2.1- Ensaio de desgaste abrasivo para o estudo dos regimes de desgaste no aço AISI 1004

Na Figura 5.4 pode-se observar que a perda de volume acumulado no tempo para a carga de 15 N, apresenta um comportamento linear, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9976$. Indicando que, provavelmente o término do período de amaciamento ocorre para tempos de ensaio inferiores a 5 min. Na Figura 5.5 pode-se observar as respectivas taxas de perda de volume. Portanto, das Figura 5.4 e 5.5, pode-se afirmar que os ensaios de desgaste foram realizados em regime permanente, entre 5 min (ou 500 m) e 25 min (ou 3500 m).

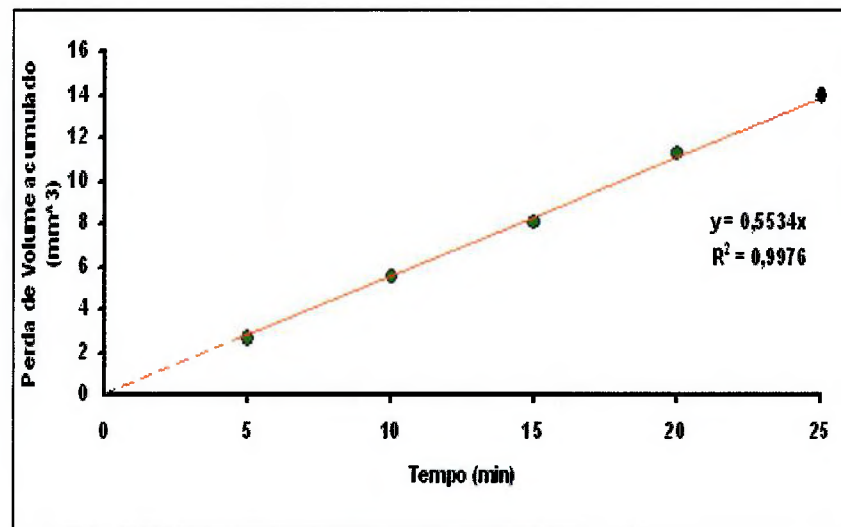


Figura 5.4 - Perda de volume acumulada em função do tempo. Carga de 15 N, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004

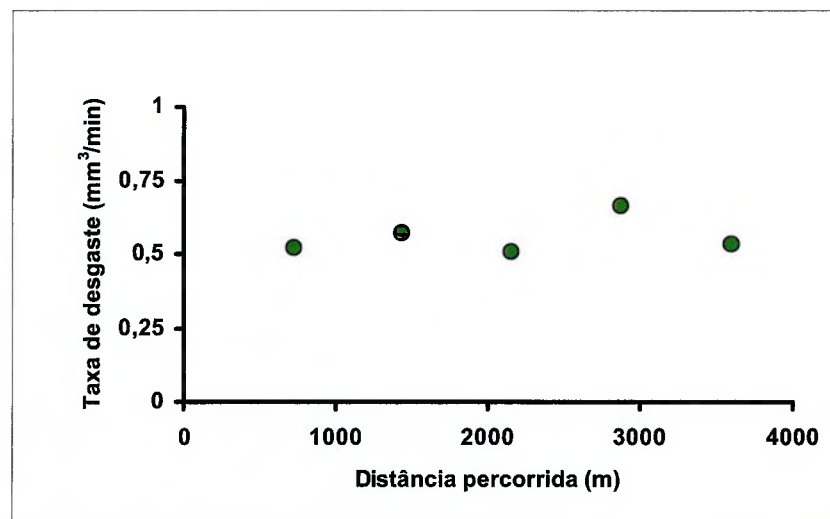


Figura 5.5 - Taxa de desgaste em função da distância percorrida. Carga de 15 N, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004

5.2.2- Ensaios de desgaste abrasivo para o estudo dos regimes de desgaste no aço AISI D2

Na Figura 5.6 observa-se que a curva de perda de volume em função do tempo, para aço AISI D2 e carga de 50 N, apresenta um comportamento linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9994$.

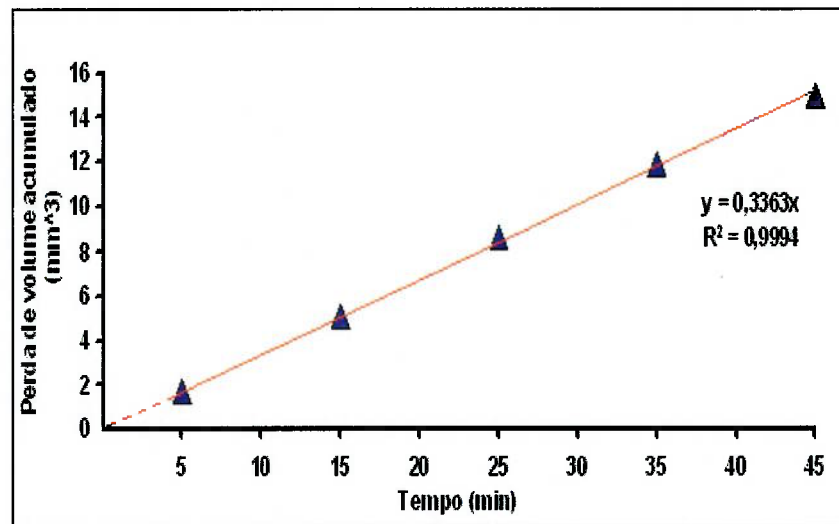


Figura 5.6 - Perda de volume acumulada em função do tempo. Carga de 50 N, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2

Na Figura 5.7, apresenta-se o comportamento da taxa de desgaste em função da distância percorrida. Observa-se que a taxa de desgaste apresenta valores aproximadamente constantes no tempo. Por isto e pela Figura 5.6, pode-se afirmar que o período de amaciamento ocorreu para períodos de tempo menores que os 5 min (ou 500 m) usados no presente ensaio.

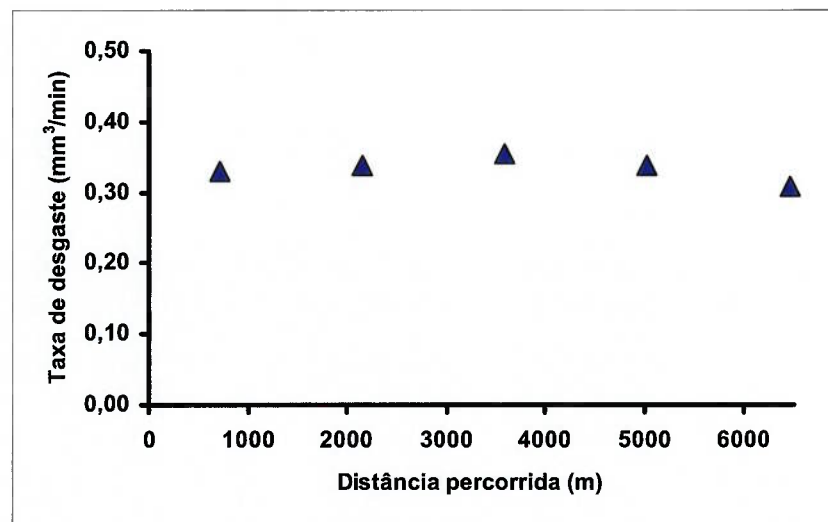


Figura 5.7 - Perda de volume acumulada em função da distância percorrida. Carga de 50 N, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2

5.3- Desgaste

Verificou-se nos experimentos cujos resultados são apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2, a sensibilidade do equipamento para detectar variações de

carga normal, tamanho de grão do abrasivo e materiais com durezas bastante diferenciadas (aço AISI 1004 e aço AISI D2).

5.3.1- Aço AISI 1004

Os resultados de perda de volume obtidos após os ensaios de desgaste do aço AISI 1004, utilizando o abrasivo ANB 50 e um tempo de 10 min, apresentam um comportamento crescente com o aumento da carga normal aplicada, como se observa na Figura 5.8. Comportamento semelhante a este foi observado quando os ensaios foram realizados utilizando areia ANB 100, cujos resultados são mostrados na Figura 5.9.

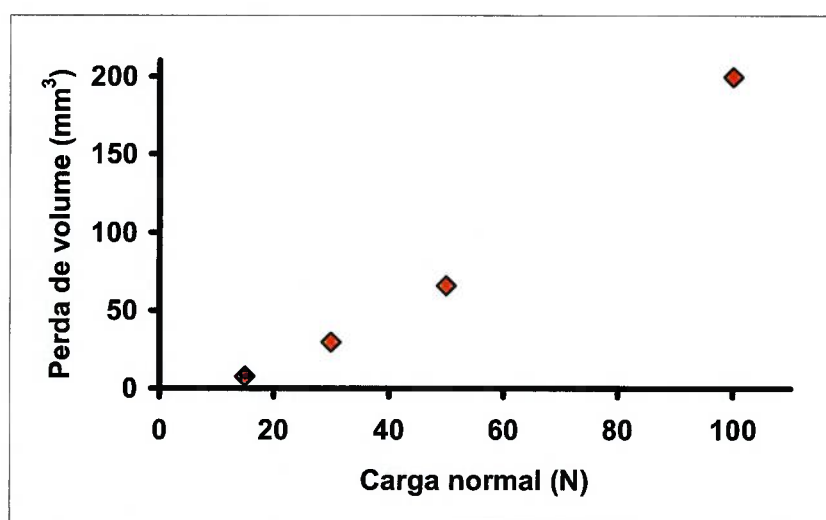


Figura 5.8 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI 1004

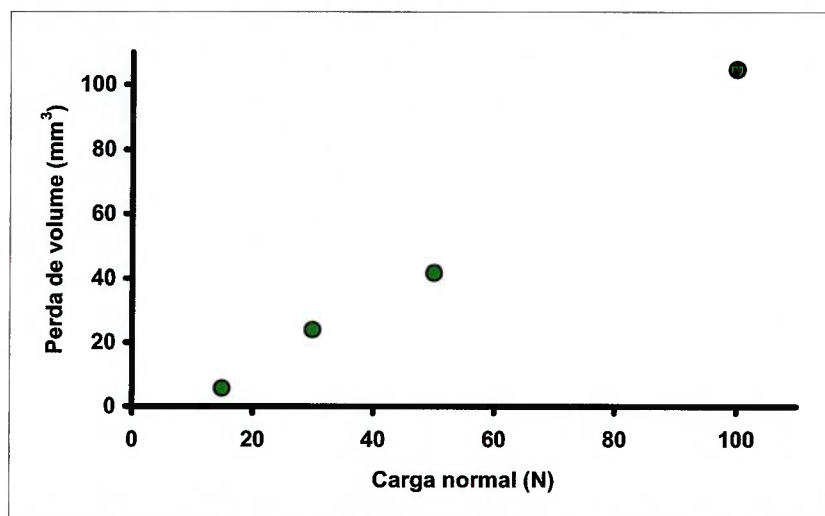


Figura 5.9 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004

A Figura 5.10 compara resultados de perda de volume de amostras do aço AISI 1004 ensaiadas com os dois tamanhos de abrasivo. As curvas mostram que com a areia com maior tamanho de grão ocasionou sempre a maior perda de volume, mas esta diferença se torna significativa para as maiores cargas.

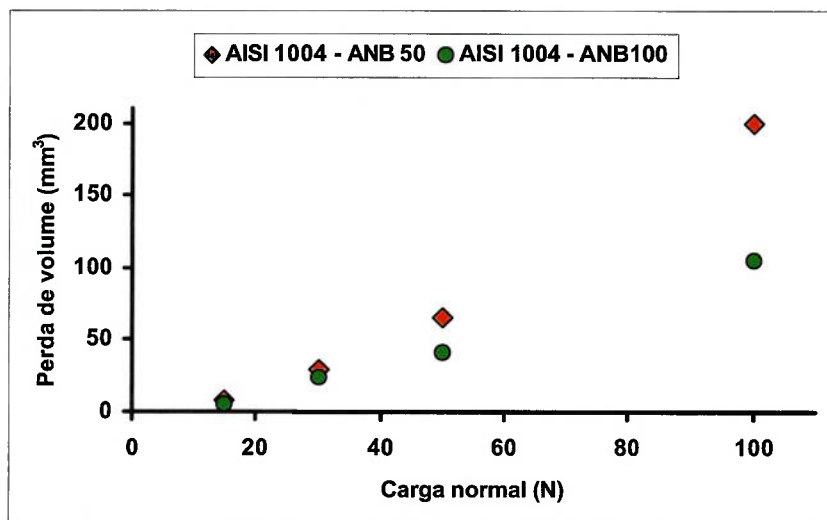


Figura 5.10 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI 1004

5.3.2- Aço AISI D2

Nas Figuras 5.11 e 5.12 apresentam-se os valores da variação da perda de volume do aço AISI D2 em função da carga normal aplicada para ensaios realizados com o abrasivo ANB 50 e 100, respectivamente.

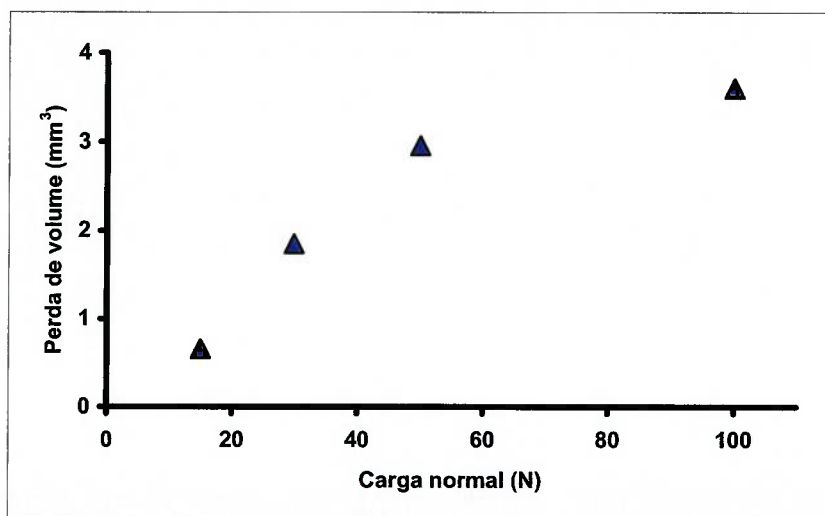


Figura 5.11 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2

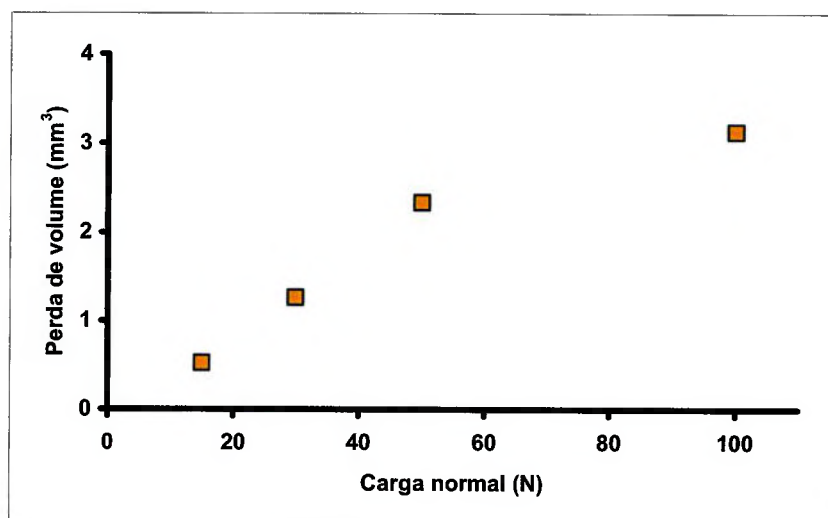


Figura 5.12 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI D2

Nos dois casos a perda de volume é crescente com a carga aplicada exibindo, entretanto tendência à estabilização. Nota-se que para as três primeiras cargas normais há tendência ao crescimento proporcional dos valores de perda volumétrica. Entretanto, quando se passa de 50 para 100 N nota-se que os valores de perda volumétrica variam menos do que entre 30 a 50 N, apresentando uma tendência à estabilização.

Na Figura 5.13 comparam-se os resultados dos ensaios de desgaste realizados no aço AISI D2 em função da carga normal para os dois tamanhos abrasivo. As curvas apresentam um comportamento muito semelhante.

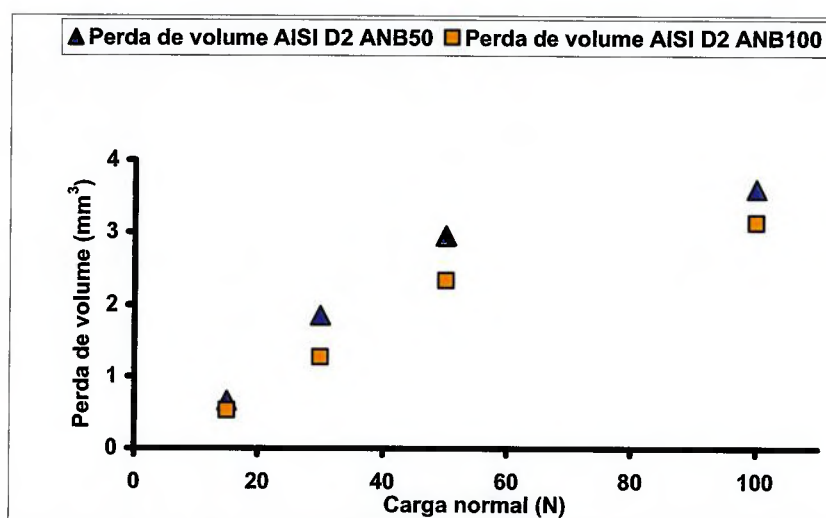


Figura 5.13 - Perda de volume acumulada em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI D2

Comparando-se o efeito da carga sobre o desgaste dos dois materiais (Figuras 5.10 e 5.13), verifica-se que na faixa de cargas estudada o desgaste do aço AISI 1004 manteve tendência de crescimento, enquanto que o desgaste do aço AISI D2 parece se estabilizar para as cargas mais elevadas empregadas neste estudo.

Comparando-se o efeito do tamanho do abrasivo sobre o desgaste dos dois materiais (Figuras 5.10 e 5.13), verifica-se que para os tamanhos de grão abrasivo, o desgaste do aço AISI 1004 foi mais sensível a variação desta variável do que o aço AISI D2. Este resultado está resumido na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Comparação percentual de desgaste entre aço AISI 1004 e aço AISI D2 como função da carga aplicada

| Carga | Aumento percentual de desgaste com o aumento do grão do abrasivo | |
|-------|--|---------|
| | AISI 1004 | AISI D2 |
| 15 | 38 | 25 |
| 30 | 22 | 46 |
| 50 | 58 | 27 |
| 100 | 90 | 15 |

5.4- Coeficiente de atrito

Os resultados apresentados a seguir mostram a sensibilidade do equipamento às variações de força aplicada, tamanho de grão do abrasivo e materiais (aços 1004 e D2).

5.4.1- Aço AISI 1004

Na Figura 5.14, apresentam-se os valores de coeficiente de atrito para ensaios em aço AISI 1004 usando abrasivo ANB 50 e variando as cargas de ensaio.

Pode-se observar que à medida que aumenta a carga normal aplicada os valores de coeficiente de atrito também aumentam. Nota-se que este aumento é mais acentuado quando as cargas variam de 10 a 50 N. Posteriormente, esse aumento é menos significativo, verificando-se uma tendência a se estabilizar em valores próximos de 0,36, quando a carga é de 100 N.

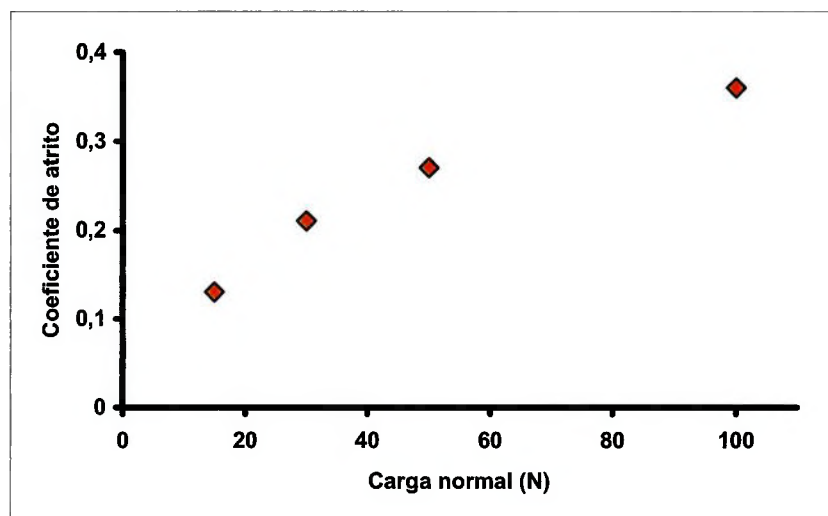


Figura 5.14 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI 1004

Na Figura 5.15, apresentam-se os valores de coeficiente de atrito variando com a carga normal aplicada em ensaios com abrasivo ANB 100.

Observa-se que os valores de coeficiente de atrito aumentam à medida que a carga é incrementada. Nota-se também, que com a carga de 50 N o valor de coeficiente de atrito foi de 0,34, valor muito próximo do 0,38 obtido quando a carga foi de 100 N. Portanto, a tendência do coeficiente de atrito é à estabilização à medida que a carga normal é aumentada para estas condições de ensaio utilizadas.

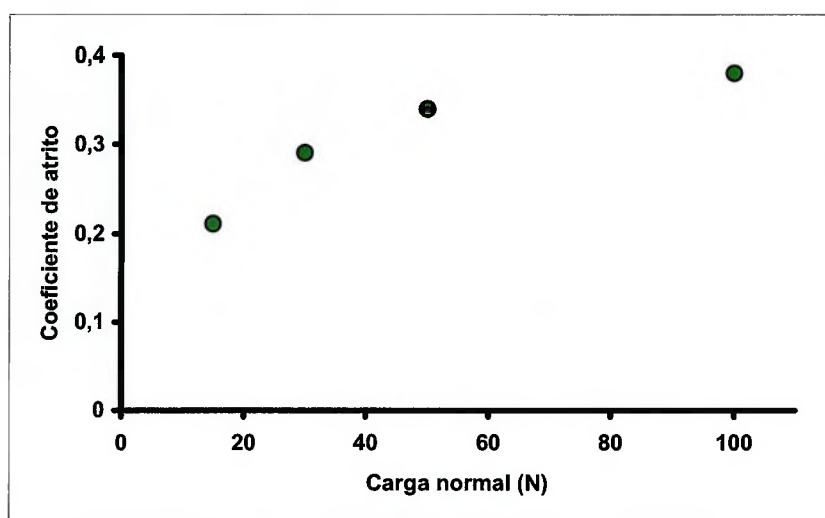


Figura 5.15 Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI 1004

Na Figura 5.16, mostra-se que o abrasivo ANB 100 apresentou sempre maior coeficiente de atrito nos ensaios do aço AISI 1004. Observa-se ainda que a diferença entre os coeficientes de atrito diminui a medida em que se a carga aplicada foi elevada. Constatase ainda, que a tendência à estabilização do coeficiente de atrito é mais evidente para a areia ANB 100 do que para a areia ANB 50. Por fim nota-se que, para a areia mais grossa, os valores do coeficiente de atrito variaram numa faixa menor com a variação de carga do que para a areia mais fina.

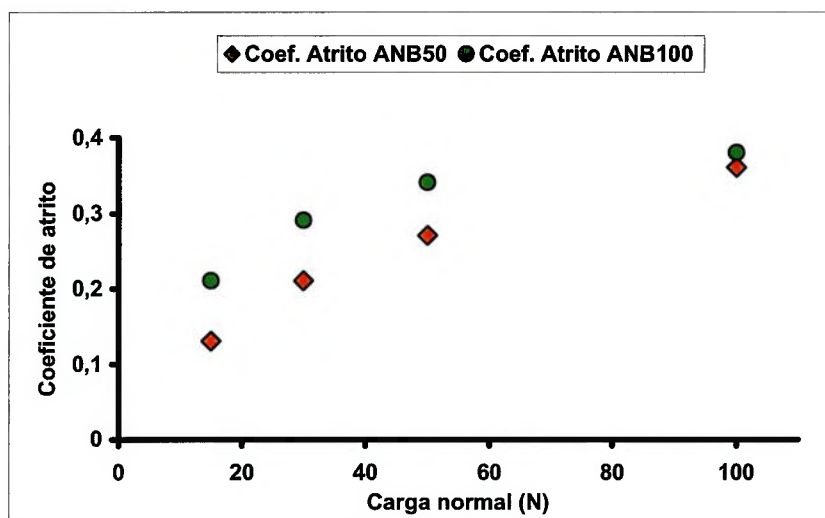


Figura 5.16 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI 1004

5.4.2- Aço AISI D2

Na Figura 5.17, apresentam-se os valores de coeficiente de atrito em função da carga normal, obtidos dos ensaios de desgaste utilizando o abrasivo ANB 50 em aço AISI D2. O coeficiente de atrito se eleva ao se elevar a carga do ensaio de 15 para 30 N, mantendo-se a partir daí com valores praticamente constantes.

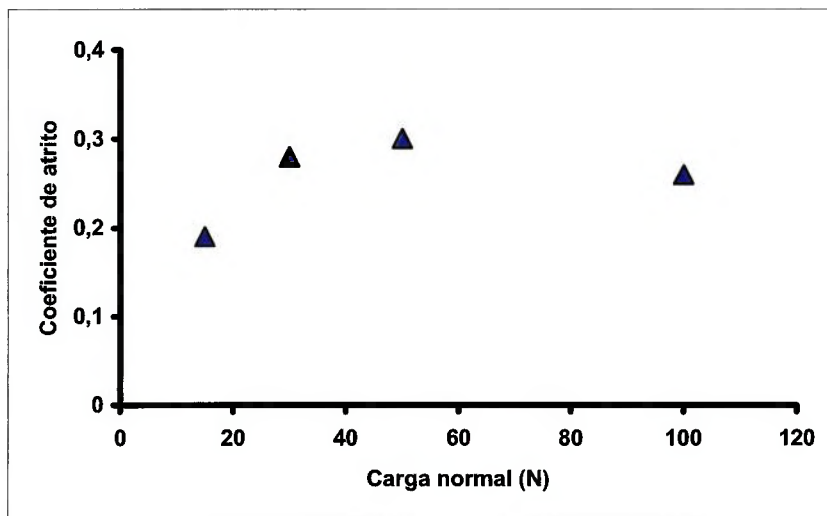


Figura 5.17 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 50 e aço AISI D2

Na Figura 5.18, apresentam-se os resultados de coeficiente de atrito em função da carga normal, obtidos a partir dos ensaios de desgaste realizados utilizando o abrasivo ANB 100 e um tempo de 10 min por ensaio. Nota-se que o comportamento do coeficiente de atrito com a elevação da carga foi semelhante ao observado na Figura 5.17.

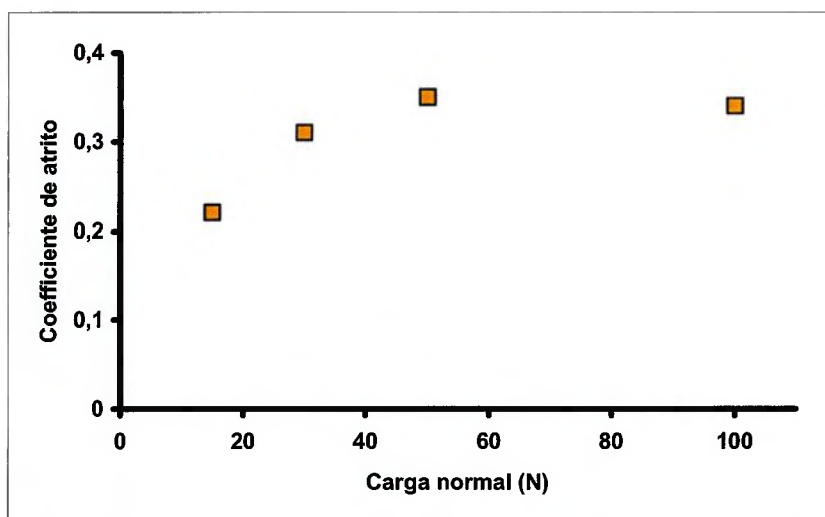


Figura 5.18 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivo ANB 100 e aço AISI D2

A Figura 5.19 permite a comparação dos resultados para os dois tamanhos de grão abrasivo estudados mostrando que os valores de coeficiente de atrito foram sempre maiores quando se empregou abrasivo menor.

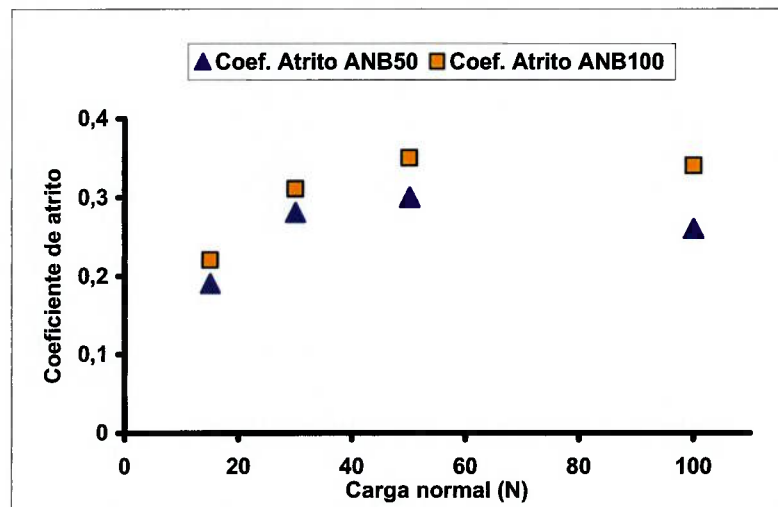


Figura 5.19 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e 100 e aço AISI D2

5.5- Discussão do desgaste

Na Tabela 5.4 e na Figura 5.20, mostram-se os resultados de perda de volume para os dois aços em função do tipo de abrasivo e da carga normal aplicada. Pode-se afirmar que à medida que se aumenta a carga normal, o desgaste também aumenta independente do material ensaiado. Verifica-se também, que o desgaste é sensível ao tamanho do abrasivo, observando-se que para tamanhos maiores de abrasivo, os valores de desgaste também serão maiores, mantidas as cargas constantes. Por fim, observa-se, como era de se esperar, que o aço AISI 1004 apresenta maior desgaste que o aço AISI D2, independente do tipo de abrasivo ou carga aplicada utilizada.

Tabela 5.4 - Resultados e análise percentual da perda de volume nas diferentes condições de ensaios

| | PERDA DE VOLUME (mm ³) | | | | | |
|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------------|--------|----------------|
| | Aço AISI 1004 | | | Aço AISI D2 | | |
| | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) |
| 15 N | 5,46 | 7,56 | 38 | 0,52 | 0,65 | 25 |
| 30 N | 23,67 | 28,95 | 22 | 1,26 | 1,84 | 46 |
| Incremento (%) | 333 | 282 | | 142 | 183 | |
| 50N | 41,40 | 65,40 | 58 | 2,33 | 2,95 | 27 |
| Incremento (%) | 75 | 126 | | 85 | 60 | |
| 100 N | 104,79 | 199,20 | 90 | 3,13 | 3,60 | 15 |
| Incremento (%) | 153 | 204 | | 34 | 22 | |

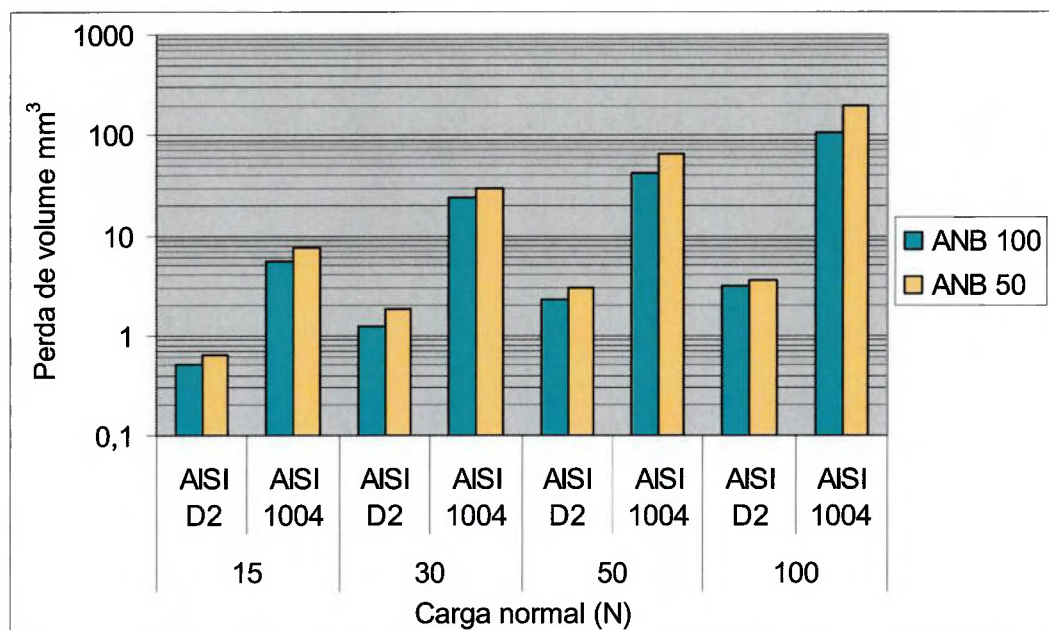


Figura 5.20 - Perda de volume em função da carga normal e tipo de abrasivo para ensaios realizados com aços AISI 1004 e D2

5.5.1- Efeito da carga no desgaste do aço AISI 1004

O desgaste sempre se elevou com o aumento da carga aplicada, conforme amplamente comentado na literatura para ensaios com abrasômetros pino-contra-disco (Nathan; Jones, 1966); (Misra; Finnie, 1981). e em abrasômetros roda-de-borracha (Misra; Finnie, 1980); (Stevenson; Hutchings, 1996).

5.5.2- Efeito do tamanho de grão no desgaste do aço AISI 1004

O desgaste do aço AISI 1004 foi maior quando o ensaio de desgaste foi realizado com abrasivo mais grosso. Comparando-se os efeitos da mudança de abrasivo de ANB 100 para ANB 50, nota-se que a perda de volume aumenta de 38 % para carga de 15 N, 22 % para carga de 30 N, 58 % para carga de 50 N e 90 % para carga de 100 N.

O efeito do tamanho de grão no desgaste abrasivo é bem conhecido e foi mostrado na Figura 2.9 p.10, que foi modificada, conforme mostrado na Figura 5.21.

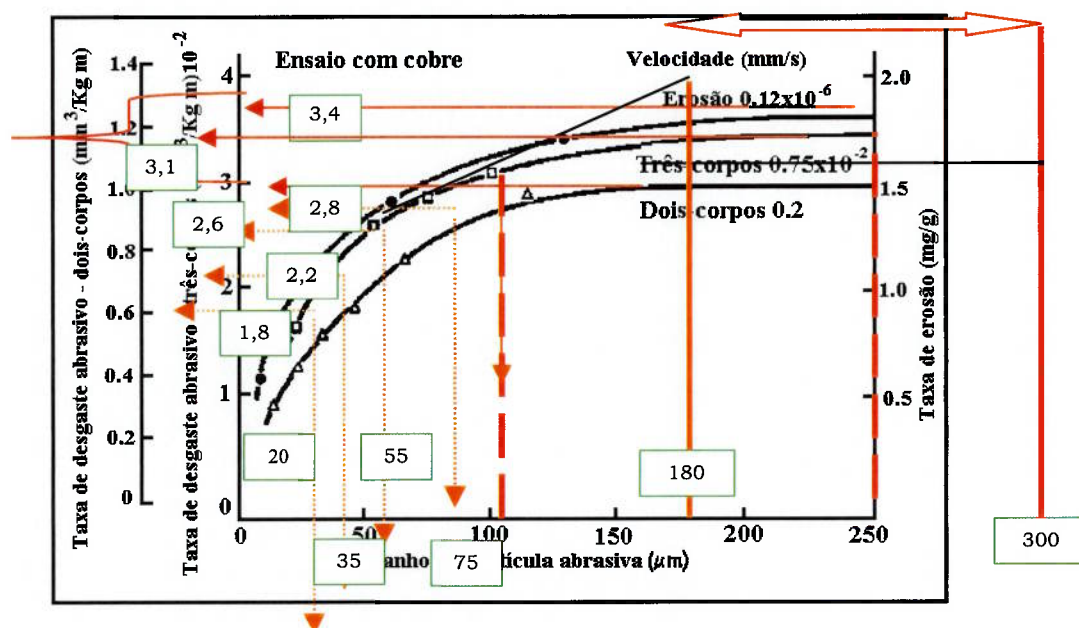


Figura 5.21 - Análise da taxa de desgaste com o tamanho do abrasivo, para condições de abrasão a três corpos. Aço AISI 1020. Adatado de Misra; Finnie (1981)

Para comparar os dados de Misra; Finnie (1981), com os deste trabalho (abrasivos de 150 e de 300 μm , faixa na qual no haveria variação significativa) foi formulada uma hipótese de que o efeito do tamanho de grão na taxa de desgaste observado para cobre vale qualitativamente para os aços estudados neste trabalho. Com os dados da Figura 5.21, determinou-se a taxa de desgaste para os pontos experimentais de Misra; Finnie (1981), cujos valores são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Análise percentual da taxa de desgaste com o tamanho do abrasivo; abrasão a três corpos. Aço AISI 1020 (Misra; Finnie, 1981)

| Tamanho abrasivo (μm) | Taxa de desgaste | Porcentagem (%) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 180(estimado) | 3,4 | |
| 100 | 3,1 | 10 (regime de pequena influencia do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste) |
| 75 | 2,8 | 11 |
| 55 | 2,6 | 8 |
| 35 | 2,2 | 18 |
| 20 | 1,7 | 29 (30 para variação de 20 μm no tamanho do abrasivo) |
| Varição total do TG 80 μm | Varição total da taxa de desgaste 1,4 | Porcentagem devida à variação total 93. Regime de grande efeito do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste. |

Observa-se que todos os pontos experimentais referem-se a abrasivos com 100 μm ou menos, ou seja todos dentro da região de efeito pronunciado do tamanho de grão do abrasivo na taxa de desgaste.

Na região onde a variação da taxa de desgaste com o tamanho de grão é mais intensa, observa-se que o efeito da mudança do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste é aumenta entre 100 e 20 μm . As oscilações que se observam na Tabela 5.5, podem se dever à dificuldade de analisar os dados da Figura 5.21. Tomando-se os dados experimentais extremos, ou seja uma variação de 80 μm no tamanho de grão obtém-se 93 % de variação na taxa de desgaste.

Na região onde a variação da taxa de desgaste com o tamanho de grão é menos intensa a variação da taxa de desgaste com o tamanho de grão foi calculada tomando-se os dados do abrasivo com 100 μm e o ponto que corresponderia a um abrasivo com 180 μm , mantendo uma variação igual a utilizada na outra região. Com estes dados obtém-se 10 % de variação na taxa de desgaste. Considerando a forma da curva é de se esperar que para tamanhos de grãos maiores, como os empregados neste trabalho, a variação na taxa de desgaste seja menor que 10 %.

Da Tabela 5.6, verifica-se que os valores de variação de taxa de desgaste devido à variação do tamanho de grão não atingiu em nenhum caso os 93 % para uma variação de 80 μm do tamanho de grão. O que se pode afirmar, entretanto, é que para as cargas de 50 e 100 N as variações de taxa de desgaste são expressivamente maiores que a taxa de 10 % estimada para a região na qual a taxa de desgaste sofre efeito moderado da variação do tamanho de grão do abrasivo.

Tabela 5.6 - Resultados e análise percentual da taxa de desgaste

| Material | AISI 1004 | | | | AISI D2 | | | |
|----------------|-----------|--------|----------------|--|---------|--------|----------------|--|
| | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) | Incremento para uma variação de 80 μm | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) | Incremento para uma variação de 80 μm |
| 15 N | 5,46 | 7,56 | 38 | 20 | 0,52 | 0,65 | 25 | 13 |
| 30 N | 23,67 | 28,95 | 22 | 12 | 1,26 | 1,84 | 46 | 24 |
| Incremento (%) | 333 | 282 | | - | 142 | 183 | | - |
| 50N | 41,40 | 65,40 | 58 | 31 | 2,33 | 2,95 | 27 | 14 |
| Incremento (%) | 75 | 126 | | - | 85 | 60 | | - |
| 100 N | 104,7 | 199,2 | 90 | 48 | 3,13 | 3,60 | 15 | 8 |
| Incremento (%) | 153 | 204 | | - | 34 | 22 | | - |

Esta análise precisa ser apoiada por mais evidências experimentais com o objetivo de confirmar se o efeito combinado da carga e do tamanho de grão se desloca, podendo transitar de um efeito moderado para um efeito severo, como sugerem os dados de desgaste para o aço AISI 1004.

Outros dois argumentos reforçam a importância de estudos mais precisos e detalhados sobre o tema. O primeiro argumento se refere a que as variações na força aplicada têm efeito sempre maior do que variações do tamanho de grão, como mostrado na Tabela 5.4. O segundo argumento é que o efeito da homogeneidade do abrasivo não foi considerado no trabalho de Misra; Finnie (1981), o qual foi analisado neste trabalho (Vide item 5.1).

A diminuição da perda de massa com a diminuição do tamanho de grão abrasivo para cada carga estudada pode ser explicada pela mudança dos mecanismos de desgaste com a elevação da carga.

Na Figura 5.22(A), apresenta-se a superfície do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 100. Observam-se microimpressões devido ao rolamento das partículas abrasivas na superfície do aço. Com este movimento o abrasivo danifica o material por sucessivas deformações plásticas e a remoção do mesmo deve se dar por fratura como ocorre nos fenômenos de fadiga de baixo ciclo.

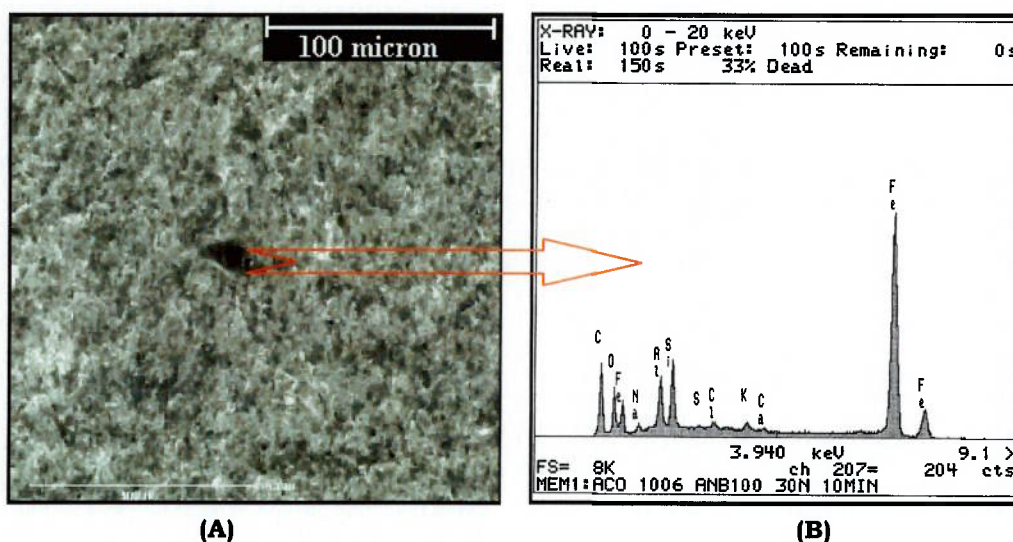


Figura 5.22 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 100. Foto MEV

Na Figura 5.22(B) apresentam-se os resultados da análise química por espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDX) realizada na região indicada com seta vermelha na imagem (A). Verifica-se a presença de elementos próprios do aço (C, Fe, Si, Al), bem como de elementos do abrasivo (Si, O), e da borracha (S, Ca, K). Esta evidência sugere que houve adesão entre o abrasivo e a borracha (ou entre corpo-de-prova e a borracha), bem como incrustação do abrasivo no corpo-de-prova. Com as evidências obtidas não foi possível precisar a seqüência de eventos que resultou na configuração da Figura 5.22(A).

Nas Figuras 5.23(A) e (C), apresentam-se as superfícies do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 50. Observa-se a presença do mecanismo de sulcamento (ou de corte). A análise por EDX da região indicada (Figura 5.22(B)), mostrou a presença de elementos químicos do (aço), e também de elementos do abrasivo. Isso mostra que partículas do abrasivo incrustaram-se na superfície ensaiada.

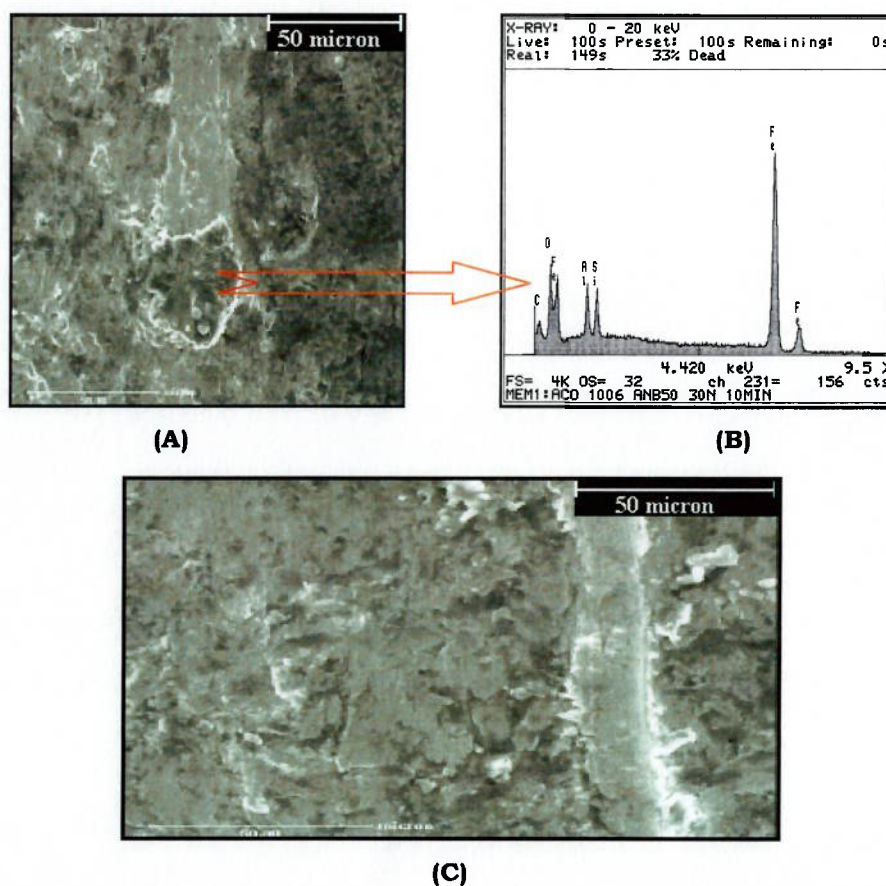


Figura 5.23 - Superfície do aço AISI 1004 ensaiado com abrasivo ANB 50

Na Figura 5.24, apresenta a morfologia do abrasivo ANB 100 antes dos ensaios de desgaste.

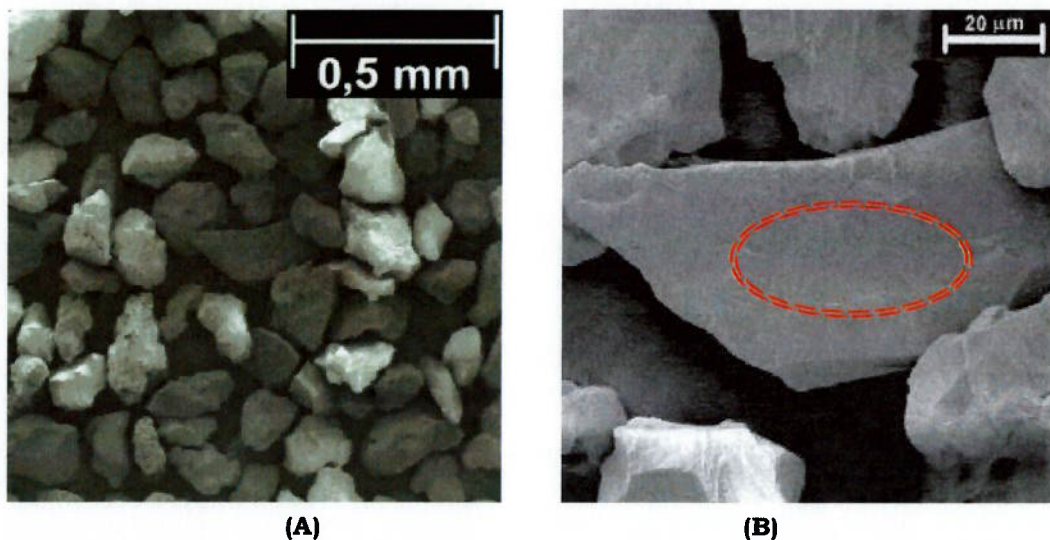


Figura 5.24 - Morfologia do abrasivo ANB 100 antes do ensaio de desgaste mostrando partículas alongadas e pontudas. Foto MEV

Nota-se que as partículas abrasivas são alongadas, pontudas e rugosas como ressaltado pela elipse vermelha na Figura 5.24(B). Isso foi provocado pela quebra à que foram submetidos os abrasivos para alcançar a granulometria desejada.

Na Figura 5.25, mostra-se apresenta a morfologia do abrasivo ANB 100 após o ensaio de desgaste com o aço AISI 1004.

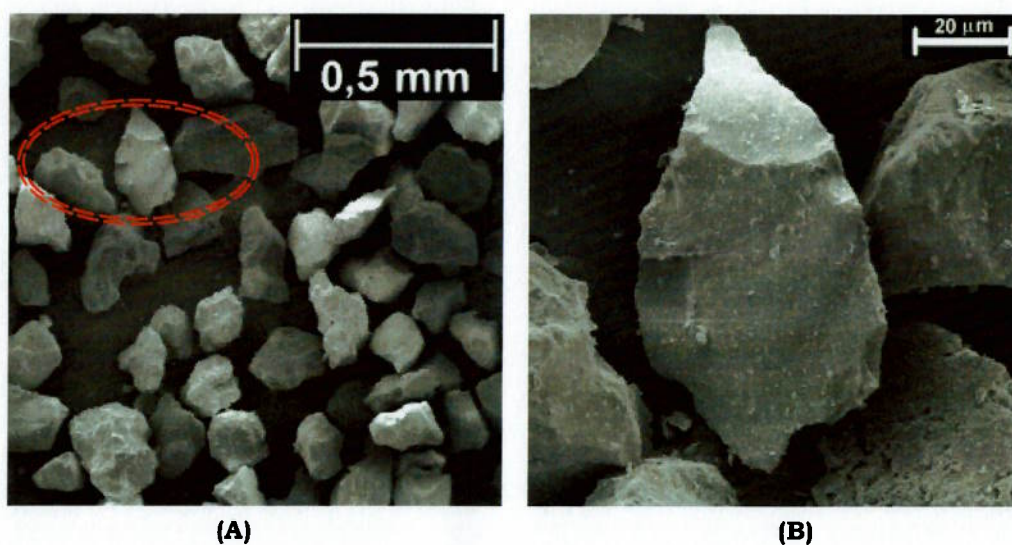


Figura 5.25 - Morfologia do abrasivo ANB 100 após os ensaios de desgaste com o aço AISI 1004, mostrando partículas alongadas e pontudas. Foto MEV

Observa-se que o abrasivo não sofreu maiores mudanças após desgaste contra o aço AISI 1004, preservando inclusive sua rugosidade. Este efeito difere do observado em ensaios de erosão por Mesa (2001). Este autor observou que em ensaios de erosão não ocorria a quebra do abrasivo, porém havia um polimento do mesmo, decorrente do movimento relativo entre partículas abrasivas contra o recipiente e contra o material ensaiado (quartzo, SiO_2). As tensões contra os abrasivos eram seguramente menores que nos ensaios realizados no equipamento roda-de-borracha, mesmo assim o movimento relativo entre abrasivos, entre abrasivos e roda-de-borracha e entre abrasivos e amostra não foi suficiente para eliminar totalmente a rugosidade dos grãos abrasivos.

Na Figura 5.26, apresentam-se as microfotografias do abrasivo ANB 50 antes e depois dos ensaios de desgaste com aço AISI 1004.

Observa-se que a morfologia das partículas foi muito semelhante antes e após os ensaios. Portanto, concluiu-se que para os ensaios realizados com o material mais mole, para todas as cargas, o abrasivo não sofre mudança significativa de tamanho e/ou geometria.

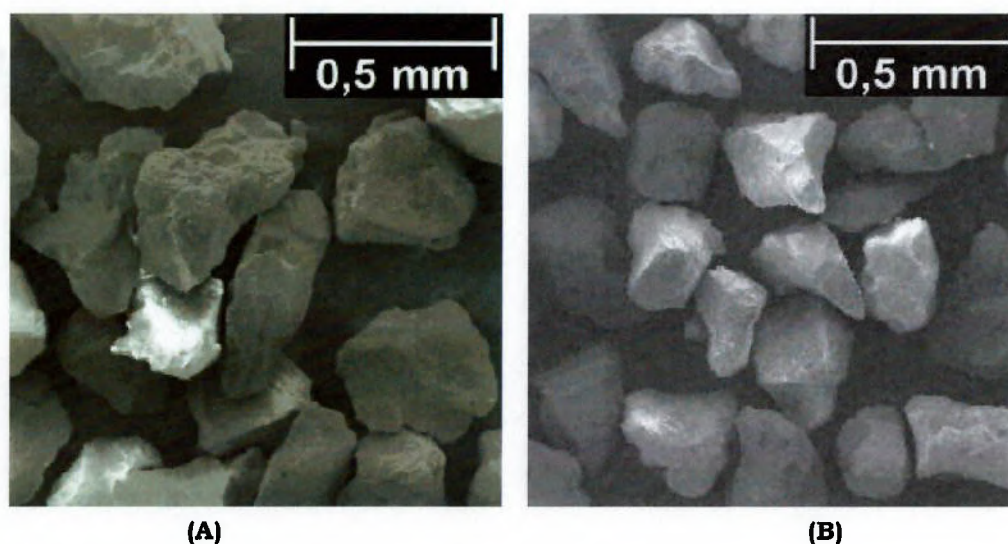


Figura 5.26 - (A) morfologia do abrasivo ANB 50 antes do ensaio de desgaste. (B) morfologia do abrasivo ANB 50 depois de ensaiado com o aço AISI 1004. Grãos alongados não uniformizados. Foto MEV

5.5.3- Efeito da carga no desgaste do aço AISI D2

As perdas de volume sempre se elevaram com a elevação da força aplicada, conforme relatado na literatura para abrasão em equipamento pino contra lixa (Nathan; Jones, 1966); (Misra; Finnie, 1981) e em abrasômetros roda-de-borracha (Misra; Finnie, 1980); (Stevenson; Hutchings, 1996).¹

Para o aço AISI D2, diferentemente do que ocorreu para o aço AISI 1004, os incrementos de força aplicada ocasionaram aumentos sucessivamente menores do desgaste. Ou seja, como se vê na Tabela 5.4, para o abrasivo ANB 100 os incrementos de desgaste foram de 142 %, 85 % e 34 % quando as cargas foram aumentadas de 15 para 100 N. Com o abrasivo ANB 50, os incrementos foram de 183 %, 60 % e 22 %, para o mesmo intervalo de variação de cargas. Atribuiu-se este comportamento a tendência ao arredondamento das partículas abrasivas com as cargas mais elevadas.

5.5.4- Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste do aço AISI D2

O desgaste do aço AISI D2 sempre foi mais intenso quando o ensaio foi realizado com abrasivo maior. Diferentemente do que ocorreu para o aço AISI 1004, o efeito do aumento do tamanho do abrasivo não foi progressivamente maior com a carga aplicada. A mudança de areia 100 para 50 provocou um aumento de desgaste de 25 % para a carga de 15 N e de 46 % para a carga de 30 N; para as cargas de 50 e 100 N os aumentos foram de 27 % e 15 % , respectivamente. Os aumentos para as cargas mais elevadas provavelmente não foram maiores devido às mudanças de forma da partícula abrasiva durante o período em que estas estiveram interagindo com o corpo e a roda-de-borracha. As partículas se tornam mais homogêneas e arredondadas como apresentado na Figura 5.27. Este fenômeno não ocorre para as cargas menores o que justificaria o aumento da diferença de desgaste entre os dois abrasivos para a carga de 30 N, único caso para o qual possivelmente o efeito do tamanho do abrasivo estaria na região na qual a taxa de desgaste é mais sensível a variação do tamanho de grão.

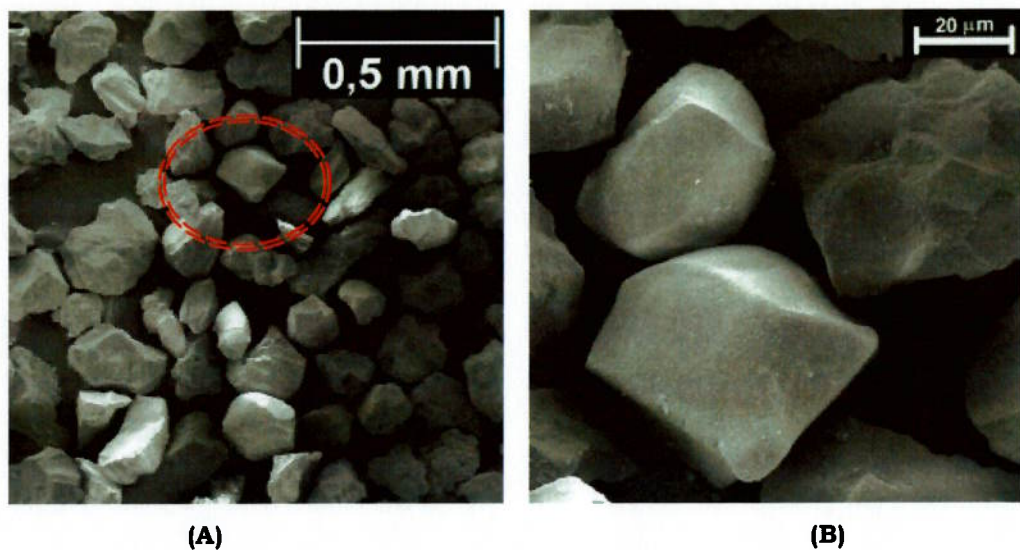


Figura 5.27 - Morfologia do abrasivo ANB 100 após o ensaio de desgaste com o aço AISI D2 mostrando grãos arredondados e de tamanho uniformizado. Foto MEV

Evidências dos mecanismos de desgaste atuantes nos ensaios com aço AISI D2 (ensaiado com areia ANB 100) podem ser observados na Figura 5.28. Observam-se evidências de deformação plástica e de vazios. Em alguns dos vazios menores, observou-se que a partícula abrasiva entrou no material e posteriormente foi removida pela ação de outras partículas ou pela interação com a roda-de-borracha giratória. Este mecanismo é muito semelhante ao observado durante os ensaios com ANB 100 em aço AISI 1004, a microimpressão.

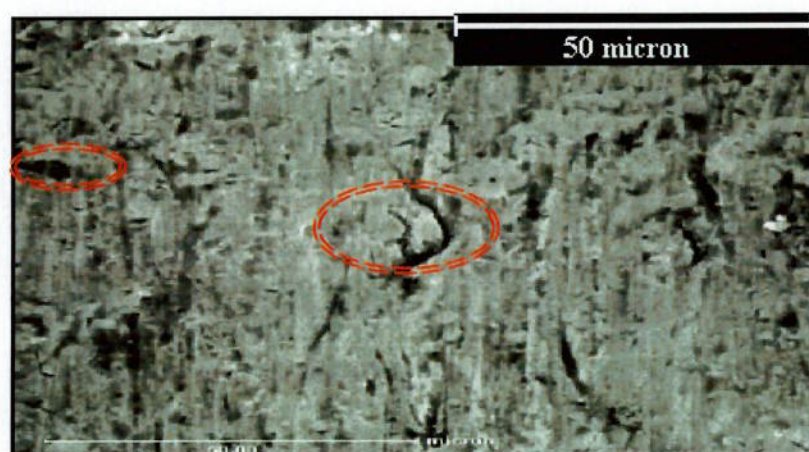


Figura 5.28 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 100. Foto MEV

Na Figura 5.29 (AISI D2 com abrasivo ANB 50), observa-se evidência de microcorte (A), dobras do material (indicando a ação de microfadiga) e vazios

superficiais (elipses vermelhas). Na Figura 5.29(B), o de EDX indica uma partícula de sílica incrustada na superfície da amostra.

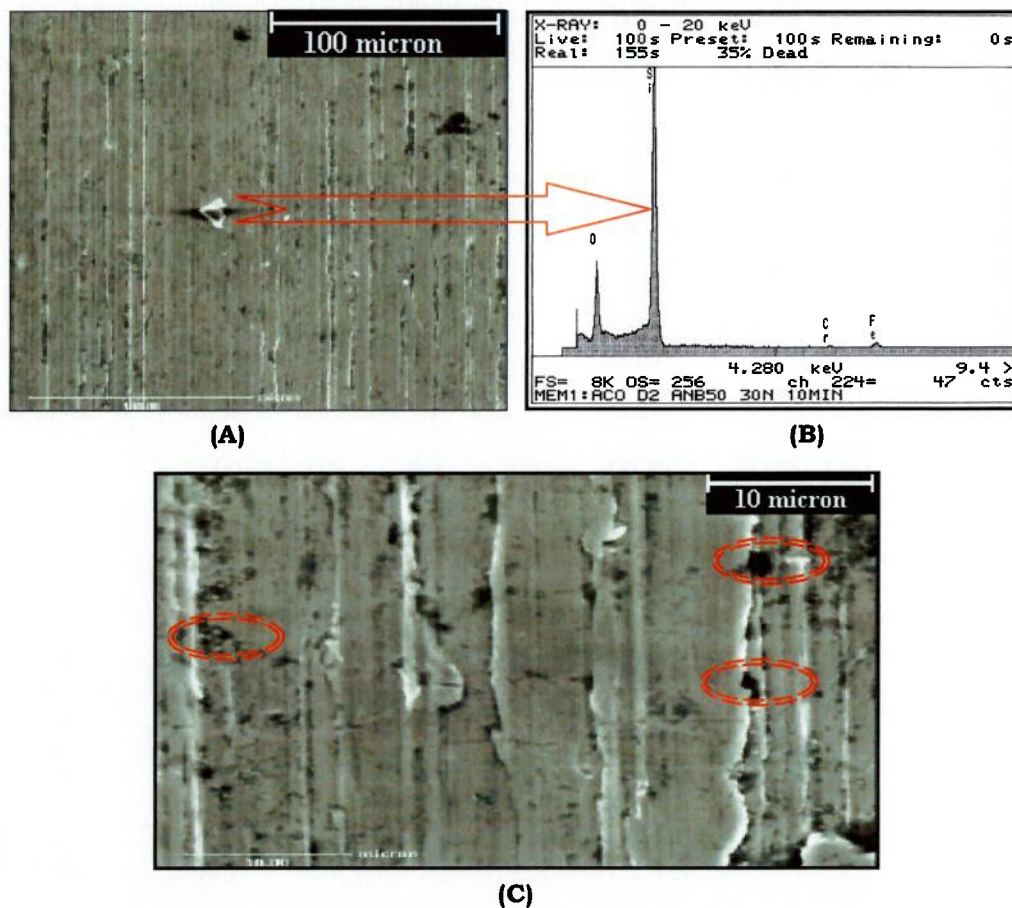


Figura 5.29 - Superfície de um corpo-de-prova de aço AISI D2, ensaiado com abrasivo ANB 50. Foto MEV

Da Figura 5.29, o engastamento de partículas abrasivas altera a influência do abrasivo na superfície ensaiada. É conhecido que para tamanhos menores de partícula abrasiva, em seu estado inicial ou devido à degradação do abrasivo (arredondamento) provocado pelo ensaio de desgaste, o ângulo de ataque também será menor; e conseqüentemente, diminuindo a capacidade de remoção de material. Esta afirmação pode ser apoiada pelos resultados apresentados na Tabela 5.4. Neste caso, o desgaste do material será motivado pela mudança ou pela ativação de outros mecanismos de desgaste, evidenciando-se ainda mais quando se vê aumentado o valor de força normal.

Comparando os resultados de desgaste entre os dois materiais nota-se que para a carga de 100 N o efeito do tamanho do abrasivo, na perda de volume, é mais acentuado no material mole (AISI 1004) que no material duro (AISI D2). Verifica-se ainda que à medida que a carga decresce até 30 N, o

efeito do abrasivo foi aumentando para o D2 e diminuindo para o AISI 1004. Para a carga de 15 N, esta tendência volta a se inverter. Estes resultados sugerem que para ensaios com aço AISI 1004 onde o abrasivo não quebra os mecanismos de desgaste se vem mais acentuados com o aumento da carga normal, contrario ao caso do aço AISI D2 onde a partícula abrasiva quebra ficando mais arredondada e por tanto menos agressiva. Já para ensaios com 15 N os resultados se invertem, possivelmente explicado pela vibração e excentricidade da roda recoberta por borracha, sendo mais evidente para baixas cargas.

5.6- Discussão do coeficiente de atrito

A seguir, apresentam-se os resultados do coeficiente de atrito para todos os casos estudados. Como não se efetuaram repetições que permitissem a comparação estatística dos resultados individuais, serão destacados apenas os aspectos mais relevantes e compatíveis com o conjunto de dados obtidos.

5.6.1- Efeito da carga

Na Tabela 5.7 e na Figura 5.30, apresentam-se os resultados obtidos de coeficiente de atrito para todas as condições de ensaio.

Tabela 5.7 - Resultados de coeficiente de atrito e análise percentual dos ensaios de desgaste

| | COEFICIENTE DE ATRITO (μ) | | | | | |
|----------------|---------------------------------|--------|----------------|-------------|--------|----------------|
| | Aço AISI 1004 | | | Aço AISI D2 | | |
| | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) | ANB 100 | ANB 50 | Incremento (%) |
| 15 N | 0,21 | 0,13 | -38 | 0,22 | 0,19 | -14 |
| 30 N | 0,29 | 0,21 | -28 | 0,31 | 0,28 | -10 |
| Incremento (%) | 38 | 61 | | 40 | 47 | |
| 50N | 0,34 | 0,27 | -21 | 0,35 | 0,30 | -14 |
| Incremento (%) | 17 | 29 | | 13 | 7 | |
| 100 N | 0,38 | 0,36 | -5 | 0,34 | 0,26 | -24 |
| Incremento (%) | 12 | 33 | | -3 | -13 | |

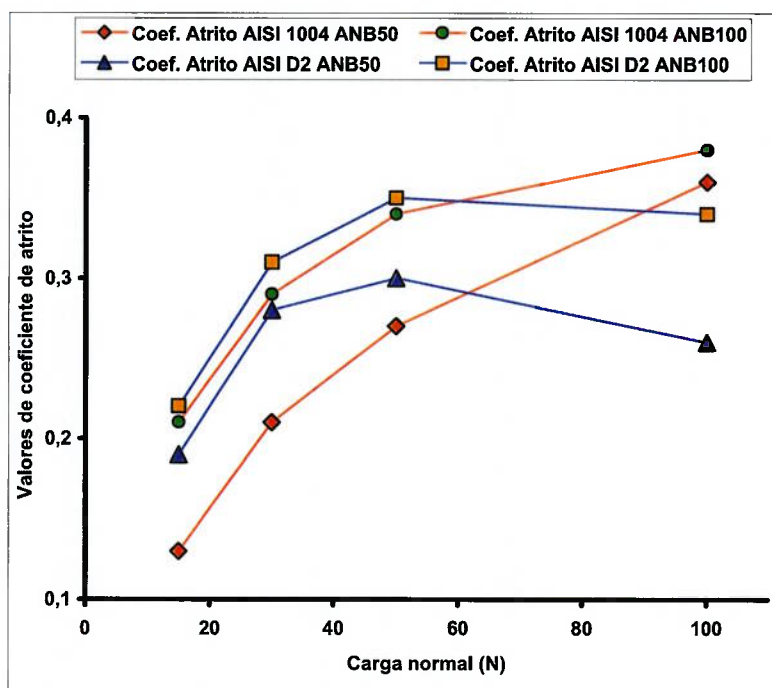


Figura 5.30 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 50 e ANB 100 e aços AISI 1004 e AISI D2

Observa-se que, de modo geral, para ambos materiais, o coeficiente de atrito aumenta conforme aumenta a carga aplicada e há uma tendência à estabilização quando as cargas são muito altas. As únicas exceções são os coeficientes de atrito para o aço AISI D2 ensaiado com os dois tamanhos de abrasivo e cargas de 100 N. Para estas condições os valores são menores que os obtidos com cargas de 50 N. Esse comportamento se deve ao arredondamento das partículas abrasivas, como mostrado ao longo deste capítulo.

Os resultados de coeficiente de atrito apresentados na Tabela 5.7 mostram claramente que o comportamento do coeficiente de atrito está influenciado pela força normal utilizada nos ensaios de desgaste, apresentando um comportamento crescente à medida que a carga normal é aumentada. Estes resultados contrariam os apresentados por Stevenson, Hutchings (1996), como se vê na Tabela 5.8.

Essa conclusão de Stevenson; Hutchings (1996) pode estar relacionada à sensibilidade do abrasômetro instrumentado para medição da força tangencial.

Tabela 5.8 - Comparação de resultados de coeficiente de atrito de Stevenson; Hutchings (1996) e deste trabalho

| Carga (N) | Abrasivo | Tamanho de abrasivo (μm) | Material AISI | Coefficiente de atrito | Referência |
|--------------|-------------|---------------------------------------|---------------|--|---------------|
| 24,5 a 122,6 | Areia Otawa | 90-150 | 1020 | 0,30 constante | Hutchings |
| 100 | ANB 100 | 150 | 1004 | 0,38 varia de forma crescente com a carga | Este trabalho |
| 24,5 a 122,6 | Areia Otawa | 90-150 | FFBAC | 0,30 constante | Hutchings |
| 100 | ANB 100 | 150 | D2 | 0,34 varia com a carga e com o tamanho de grão | Este trabalho |

Pode-se observar na Tabela 5.7 que para o aço AISI 1004 e os abrasivos ANB 100 e ANB 50, os incrementos percentuais no coeficiente de atrito diminuem, de 38 para, 28, para 21 e para 5 % quando as cargas foram elevadas de 15 para 30, para 50 e para 100 N, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento do encruamento do material na medida que a carga foi elevada.

Segundo os resultados de Zum Gahr, (1987) mostrados na Figura 5.31, verifica-se que a elevação de dureza de deformação de 200 para 300 HV causou uma redução média do coeficiente de atrito de 0,8 para 0,4, aproximadamente. Já a elevação da dureza de deformação de 300 para 400 HV levou a redução do coeficiente de atrito de 0,40 para 0,35 apenas. Observa-se que quanto maior a dureza da superfície deformada menor a variação do coeficiente de atrito, para diversos materiais.

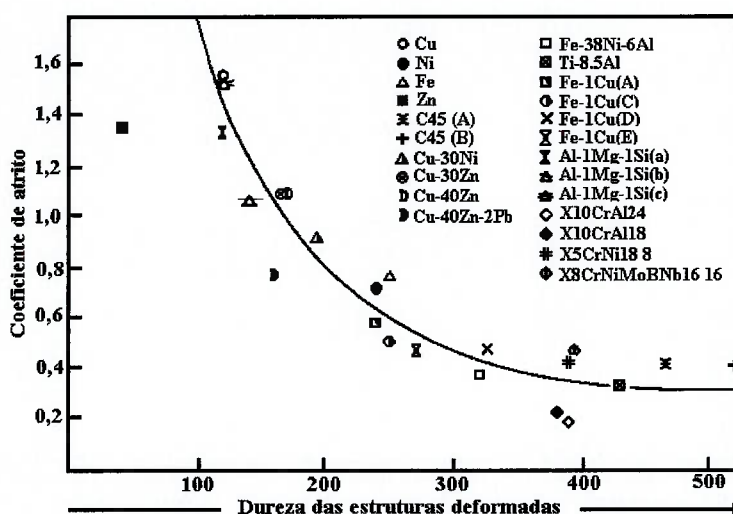


Figura 5.31 - Coeficiente de atrito em função da dureza de deformação medida em superfícies polidas de diferentes materiais, usando ensaio de riscamento com ponta de diamante e carga de 2 N (Zum Gahr, 1987)

Explicar o comportamento do coeficiente de atrito obtidos neste trabalho (Figura 5.30), utilizando-se os resultados de Zum Gahr, (1987) (Figura 5.31), depende apenas da obtenção de medidas precisas das durezas das superfícies encruadas. No entanto, isso não foi possível de ser realizado devido às irregularidades das superfícies desgastadas.

Para os ensaios com o aço AISI D2, a variação percentual do coeficiente de atrito durante os ensaios com os abrasivos ANB 100 a ANB 50 apresenta o seguinte comportamento: 14 %, 10 %, 14 % e 24 % para os ensaios com 15, 30, 50 e 100 N de carga aplicada, respectivamente. Observa-se que para cargas entre 30 e 100 N, os valores são crescentes, comportamento que possivelmente tem a ver com a mudança de geometrias e das superfícies das partículas abrasivas, devido às condições de carga normal produto das altas tensões e da dureza do corpo-de-prova que possibilita a quebrar das pontas do abrasivo. Fato que possivelmente é diferenciado para os dois tamanhos de abrasivo.

5.6.2- Efeito do material

Para as três menores cargas o coeficiente de atrito para o aço AISI 1004 é sempre menor do que para o aço AISI D2, como observado na Tabela 5.7. Para a carga de 100 N ocorre o inverso e o coeficiente de atrito para o aço AISI D2 é menor que para o aço AISI 1004.

5.6.3- Tamanho de grão abrasivo

Os resultados da Figura 5.30 e da Tabela 5.7 mostram que para todas as cargas e para os dois materiais, se mediram maiores coeficientes de atrito nos ensaios realizados com areia ANB 100 do que nos realizados com areia ANB 50.

Esses resultados contrariam os resultados apresentados por Stevenson; Hutchings (1996), em que o coeficiente de atrito obtido em abrasômetro do tipo roda-de-borracha não muda com o tamanho do abrasivo, nem com a carga aplicada e nem com a velocidade de deslizamento nos quais, Pintaúde (2002) verificou que aumentando da dureza do material no regime severo ocorria diminuição do coeficiente de atrito para ambos os tamanhos de abrasivo (#80 e #240 mesh). Em contraposição, neste trabalho, esta variação ocorreu apenas para a carga de 100 N. Para as demais cargas os maiores

coeficientes de atrito foram observados para o material mais mole. Uma possibilidade é a de que a carga aplicada pode ter um efeito no ensaio pino contra lixa como tem no presente trabalho.

Paralelamente os resultados dos ensaios em material bruto de fundição aço AISI 1006 realizados por Pintaúde (2002) (Tabela 5.9) para desgaste abrasivo a dois corpos no regime severo mostram a diminuição do coeficiente de atrito com a diminuição do tamanho do abrasivo vidro, resultados contrários a os apresentados na presente dissertação de mestrado para desgaste abrasivo a três corpos.

Tabela 5.9 – Valores médios de coeficientes de atrito. Abrasivo: vidro (Pintaúde, 2002)

| Material | Lixa grana #80 | Lixa grana #240 |
|-----------------|-----------------------|------------------------|
| AISI 1006 | 0,531±0,008 | 0,398±0,009 |

O fato do coeficiente de atrito ser maior nos ensaios com abrasivo ANB 100 que com o abrasivo ANB 50, para os dois tipos de materiais ensaiados no abrasômetro instrumentado do tipo roda-de-borracha, pode ser atribuído ao rolamento das partículas abrasivas na superfície de desgaste gerando microimpressões. Nesse movimento, as sucessivas rotações e translações do abrasivo ocasionariam mudanças constante nos ângulos de ataque e na trajetória do abrasivo. É possível que estes movimentos resultem em maiores perdas de energia e menor eficiência na remoção de material, em resumo o resultado seria, por isto o aumento de energia despendida para realizar o trabalho de desgaste abrasivo. Abrasivos maiores para os quais o mecanismo de remoção de material é principalmente por microsulcamento como mostrado neste capítulo, apresentariam, por isto coeficientes de atrito menores.

Uma segunda justificativa que explica o porquê os valores do coeficiente de atrito são maiores nos ensaios realizados com o abrasivo ANB 100 que com o abrasivo ANB 50, está relacionado com a maior área de contato para ensaios com abrasivos menores. Pois os grãos menores estão mais juntos e os espaços entre eles são menores à medida que diminui o tamanho do abrasivo; é por isto que para maior área de contato, para uma cortina de abrasivo mais densa, o trabalho necessário para se deslocar será maior que no caso de menores áreas reais de contato, ou abrasivo mais grosseiro.

Uma terceira justificativa está relacionada com a distância de separação entre o corpo-de-prova e a roda-de-borracha. Essa distância é menor com o abrasivo ANB 100, facilitando o contato direto entre o corpo-de-prova e a roda-de-borracha, aumentando desta forma a componente de adesão entre as duas superfícies, e conseqüentemente, aumentando consideravelmente o valor do coeficiente de atrito. Caso contrário ocorreu nos ensaios com o abrasivo ANB 50, onde o corpo-de-prova e a roda-de-borracha se encontram mais afastados.

Nas Figuras 5.10 e 5.13, mostrou-se que a diferença entre as taxas de desgaste dos aços AISI 1004 e AISI D2 podem chegar a quase duas ordens de grandeza. Em contraposição, nas Figuras 5.16 e 5.19, mostrara-se que os coeficientes de atrito não variam mais do que 10 % nos ensaios com areia ANB 100 e não mais do que 30 % nos ensaios com areia ANB 50. Este resultado sugere que a explicação de mudanças na taxa de desgaste e no coeficiente de atrito com base na análise de mecanismos de desgaste como foi feita neste trabalho requer maiores aprofundamentos capaz de dar conta da diferença de magnitude das variações das grandezas desgaste e atrito.

6- CONCLUSÕES

- 1 O equipamento construído no Laboratório de Fenômenos de Superfície, denominado Abrasômetro Instrumentado do Tipo Roda-de-borracha, além de cumprir com as indicações da norma ASTM G-65 quanto à construção e validação de ensaios, possui um sistema instrumentado de aplicação da carga e monitoração de parâmetros, que permite medir coeficiente de atrito e temperatura com boa reprodutibilidade de resultados para uma confiabilidade superior ao 95 % como recomendado pela norma ASTM G 65.
- 2 O sistema de aplicação e medição de forças tem sensibilidade suficiente para medir a variação dos resultados de atrito em função do tamanho de grão, da carga normal e do material.
- 3 As inovações de instrumentação introduzidas no equipamento permitem não apenas ordenar materiais enquanto a resistência ao desgaste, mas também melhorar a qualidade do estudo dos mecanismos de desgaste abrasivo, pois é possível associar a esses mecanismos as medidas de atrito correspondentes.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 Repetir os ensaios realizados com cargas de 15 a 100 N, com os mesmos abrasivos e mesmos aços de modo a avaliar a repetibilidade dos ensaios e permitir comparações estatísticas mais confiáveis entre os mesmos.
- 2 Avaliação da variação do desgaste e do coeficiente de atrito com outros tipos de partículas abrasivas, como por exemplo, óxidos de ferro e alumina.
- 3 Mediante ensaios de dureza num corte lateral à marca de desgaste, avaliar a hipótese da diminuição do gradiente do coeficiente de atrito com o aumento da força normal, para os diferentes tamanhos de grão, devido ao aço AISI 1004 alcançar o máximo encruamento.
- 4 Estudar o efeito do tamanho do abrasivo na faixa 20 a 100 μm (maior efeito do tamanho de grão na taxa de desgaste) e acima de 100 μm (menor efeito do tamanho de grão na taxa de desgaste) com amostras de cobre, aço baixo carbono, alumínio e latão de modo dar maior apoio as dados de Misra; Finnie (1981) com maior controle e variação da carga aplicada, velocidade de ensaio e da granulometria do abrasivo. Com o mesmo procedimento verificar experimentalmente os resultados de Nathan; Jones (1966) (abrasão a dois corpos).
- 5 Construir uma “versão compacta” do equipamento desenvolvido neste mestrado visando disseminá-lo entre laboratórios de tribologia, visando instituir um padrão comum para este ensaio.

ANEXOS

ANEXO A- CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo tem sido de grande importância o estudo de desgaste nas áreas de: agricultura, mineração, processamento de mineiro, movimentação da terra, etc. devido a envolver contato entre ferramentas de trabalho e rochas, ou qualquer outro tipo de partícula abrasiva.

Existem dois grandes grupos para classificar o desgaste abrasivo, sendo eles: desgaste abrasivo a dois corpos, e desgaste abrasivo a três corpos. O desgaste abrasivo a dois corpos ocorre quando as partículas abrasivas ou asperezas estão fixas no segundo corpo que desliza sobre o outro riscando ou removendo material. No desgaste abrasivo a três corpos, as partículas estão livres para rolar, de tal forma não retiram material do primeiro corpo todo o tempo em que estão em contato; conseqüentemente os ensaios de abrasão a dois corpos apresentam taxas de desgaste até três vezes maiores que os ensaios de abrasão a três corpos. Na Figura A. 1, apresentam-se diversas formas de desgaste a dois e três corpos.

Nota-se na Figura A. 1(d) que, nas configurações a três corpos, a distância entre as superfícies (D) é da mesma ordem de grandeza da dimensão média do abrasivo \bar{d} , nota-se ainda que as duas superfícies estão igualmente sujeitas à abrasão e o comportamento de uma pode afetar o comportamento da outra. A inclusão de partículas abrasivas em uma superfície mole ou sua ancoragem nos defeitos superficiais pode produzir o deslizamento desta e transformar o processo de abrasão a dois corpos.

Na Figura A. 1(e), $D > \bar{d}$, as características de uma das superfícies não tem efeito direto sobre sua oponente e a abrasão pode ocorrer em apenas uma delas sendo amortecido os choques eventuais por rearranjos das partículas abrasivas. Pode-se ainda admitir que para cada uma das superfícies consideradas isoladamente não existe diferença fundamental entre abrasão a três corpos $D > \bar{d}$ e abrasão a dois corpos com abrasivo livre (Figura A. 1(b)). Pode-se ainda distinguir, por analogia com a existência de impacto na abrasão a dois corpos, ou seja, erosão por partículas sólidas, a existência de impacto na abrasão a três corpos, Figura A. 1(e).

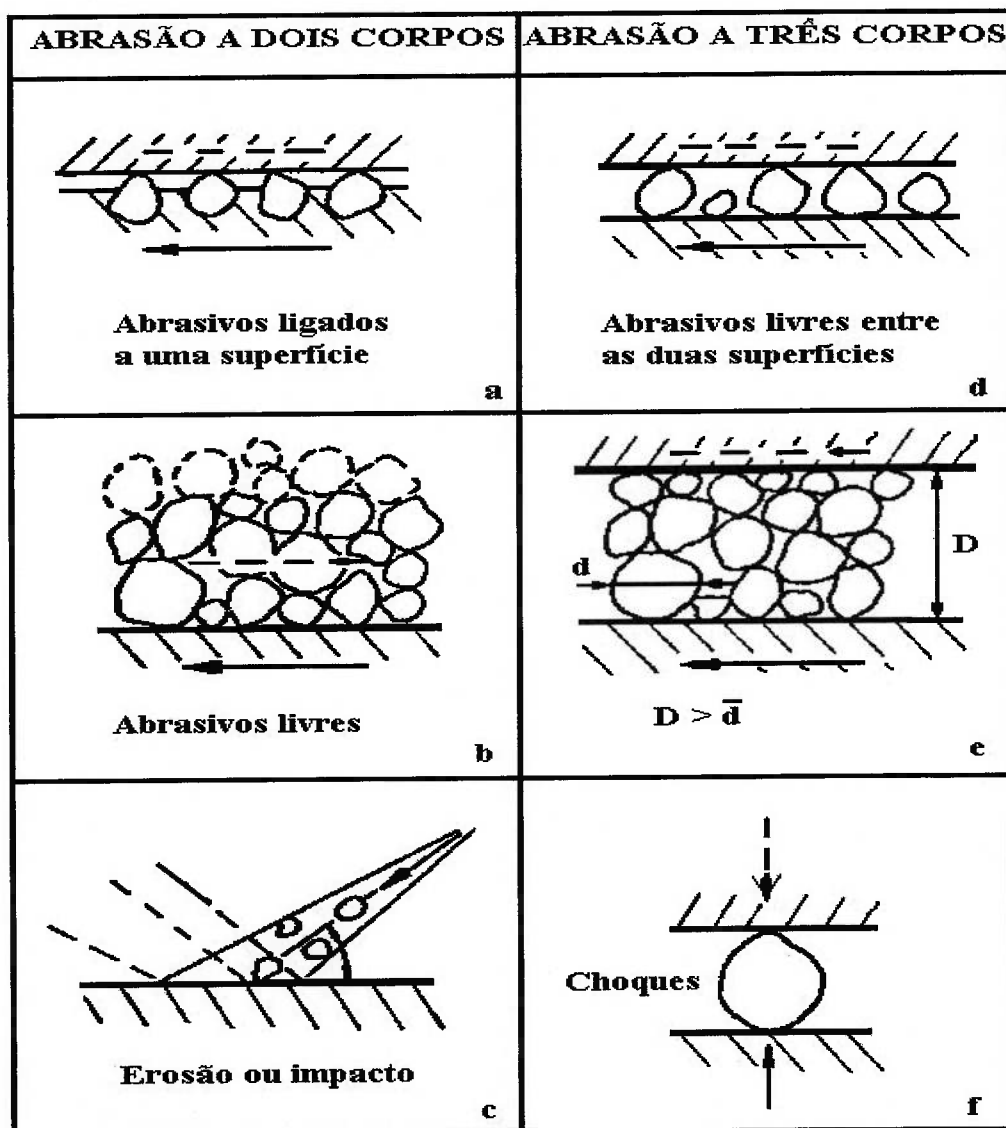


Figura A. 1 - Configurações mecânicas do processo abrasivo. (De Mello, 1989)

(Misra; Finnie, 1980), apresentaram uma subdivisão para o caso de abrasão a três corpos como sistemas abertos e sistemas fechados. Entende-se por sistemas abertos aqueles nos quais as partículas estão livres sobre uma superfície, ou quando a segunda superfície está suficientemente afastada da primeira; e sistemas fechados, aqueles nos quais as duas superfícies estão bem próximas permitindo pequenas partículas de abrasivo entre elas.

Na Figura A. 2, apresenta-se a proposta de classificação do desgaste abrasivo mencionada acima.

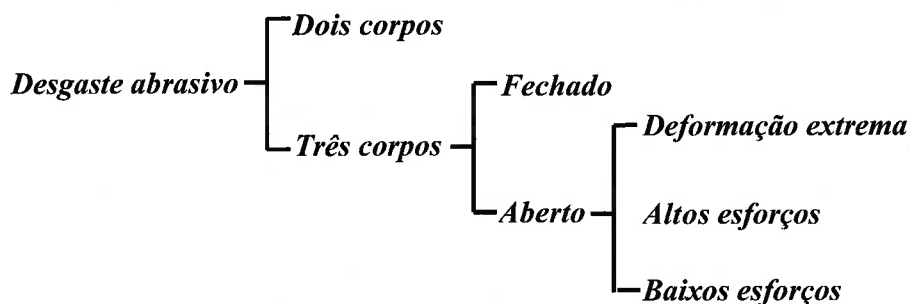


Figura A. 2 - Proposta para classificação do desgaste abrasivo (Misra; Finnie, 1980)

Outra forma de classificação do desgaste foi por intensidade de tensão; tendo como alvo do estudo o produto final ou a forma do grão abrasivo após ensaio de desgaste. Esta classificação compreende três possíveis mecanismos de quebra do grão:

- a) Abrasão: a energia aplicada é suficiente para provocar fratura significativa nas partículas abrasivas, quando o material é submetido a tensões localizadas; de tal forma que produto se torna fino em grande número de fragmentos. (Figura A. 3(a)).
- b) Clivagem: a energia aplicada, principalmente energia de compressão, consegue fazer que o grão se quebre em poucos fragmentos com características geométricas similares às do grão original (Figura A. 3(b)).
- c) Fratura generalizada: a energia aplicada é tão grande, e em ocasiões de impacto, que por razão da sobrecarga consegue quebrar o grão em fragmentos razoavelmente grandes (Figura A. 3(c)).

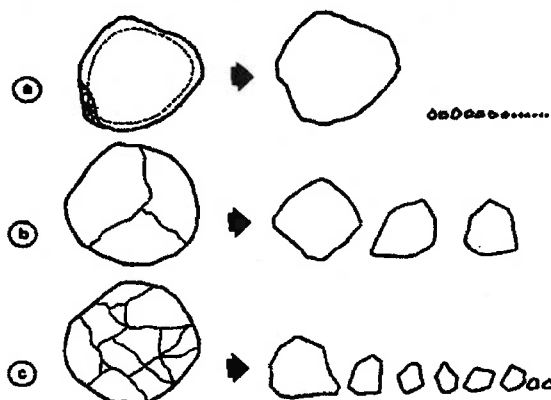


Figura A. 3 - Representação dos mecanismos de fratura das partículas (a) abrasão (tensões localizadas), (b) clivagem (forças de compressão) (c) fratura generalizada (forças de impacto) (Murilo, 1999)

Com base nas discussões realizadas anteriormente sobre as classificações tradicionais e por intensidade de tensão (Gates, 1998), sugeriu uma classificação por situação (ou condição) e outra por severidade de desgaste, como se vê na Tabela A. 1.

Tabela A. 1 - Classificação por severidade proposta por Gates (1998)

| Situação típica ^(a) | Severidade do desgaste | | |
|--------------------------------------|---|---|---|
| | <i>Moderado</i> | <i>Severo</i> | <i>Extremo</i> |
| Tamanho da partícula | Pequeno | Moderado | Grande |
| Grau de engastamento | Livre | Parcialmente engastado pelo contra-corpo | Fortemente engastado |
| Forma da partícula | Arredondado | Pontiaguda | Pontiaguda |
| Tensões de contato | Baixas (insuficientes para quebrar partículas) | Altas (suficientes para quebrar partículas) | Altíssimas (causa deformação macroscópica ou fratura frágil no material sendo desgastado) |
| Mecanismos dominantes ^(b) | Microsulcamento | Microcorte | Microcorte e/ou microfratura |
| Termos equivalentes ^(c) | Abrasão a baixas tensões Abrasão por riscamento. ^(d) Baixas tensões a três corpos ^(e) | Abrasão a altas tensões Abrasão por polimento ^(d) . Altas tensões a três corpos ^(e) . Altas tensões a dois corpos ^(e) | Abrasão por goivadura. Altas tensões a dois corpos ^(e) |

- (a) Nem todos os aspectos da “situação típica” aplicados simultaneamente.
 (b) Os mecanismos de remoção de material são altamente dependentes deste.
 (c) Já foi demonstrada a ambigüidade destes termos alternativos, assim, não é esperada uma completa correspondência com os novos termos.
 (d) Termo não favorito mesmo em outras classificações alternativas.
 (e) Interpretação dominante da distinção dois corpos/três corpos.

Gates (1998) justifica a classificação por situação devido à facilidade dos engenheiros de determinar tais situações macroscopicamente. Tomando uma base para aprofundamento do estudo do fenômeno, Gates (1998) propõe que o desgaste por abrasão seja dividido em três classes de severidade: desgaste moderado, desgaste severo e desgaste extremo. Além disso, propõe os mecanismos que levam a determinado tipo de desgaste e uma analogia com os termos até então utilizados (Murilo, 1999).

ANEXO B- ESPECIFICAÇÕES DA TRANSMISSÃO E CÁLCULO DAS CORREIAS TIPO V

Na revisão do projeto da máquina se usou um sistema de transmissão para redução da velocidade composta de motor e redutor. Com este sistema se consegue diminuir a velocidade a 1:10 da inicial, mas ainda assim, esta redução não é suficiente para conseguir as 200 rpm especificadas pela norma. Para reduzir a vibração, foi necessário acrescentar um segundo sistema de transmissão, mas neste caso, transmissão flexível, já que com esta se consegue a diminuição da vibração, e pode-se conseguir as 200 rpm de saída no disco recoberto com borracha.

Foi necessário fixar este sistema de transmissão ao piso isolado da máquina e apoiado por borracha, para não transmitir vibração a ela.

Dados do sistema de transmissão:

- Potência do motor: 2 HP.
- Velocidade do eixo do motor: 3415 rpm
- Freqüência: 60Hz
- Restrição: a máxima distância entre o eixo do redutor e o eixo do disco recoberto por borracha é 750 mm.

De acordo com o cálculo de transmissão do redutor com relação de 1:10, tem-se:

- Velocidade da polia menor: 342 rpm
- Velocidade da polia maior: 200 rpm

O perfil determinado para a correia é tipo A, para uma faixa de diâmetros da polia menor de 3 pol a 5 pol. A correia escolhida foi a A55 com um total de duas correias em V (Cálculos baseados em Shigley; Mischke (1997)).

ANEXO C- PROCEDIMENTOS RECOMENDADOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE MATERIAIS SEGUNDO A NORMA ASTM G-65

C.1 Procedimento A

Este é um ensaio relativamente severo, o qual ordena os materiais metálicos ao longo de uma extensa escala de perda de volume. É particularmente útil na classificação de materiais de média a extrema resistência à abrasão.

C.2 Procedimento B

Tem poucas variações das condições do procedimento A. Este procedimento pode ser usado para materiais de alta resistência à abrasão, mas é particularmente útil para media e baixa resistência. O procedimento B é usado quando os valores de volume perdido pelo procedimento A excedem os cem milímetros cúbicos (100 mm³).

C.3 Procedimento C

Usa-se para materiais muito duros e para finas camadas de materiais.

C.4 Procedimento D

É particularmente útil para a classificação de materiais de baixa resistência ao desgaste abrasivo.

Na Tabela C. 1 pode-se observar as condições de carga normal aplicada, rotações e abrasão em testes necessários para a calibração da máquina em concordância com os diferentes materiais estipulados pela norma ASTM G-65.

Tabela C. 1 - Parâmetros de carga, velocidade rotacional e abrasão linear para os procedimentos de padronizados recomendados pela norma ASTM G-65

| Procedimento Especificado | Carga aplicada ao corpo de prova^A (N) | Rotações do disco (rpm) | Abrasão linear (m) |
|----------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------|
| A | 130 | 6000 | 4309 |
| B | 130 | 2000 | 1436 |
| C | 130 | 100 | 71,8 |
| D | 45 | 6000 | 4309 |
| E | 130 | 1000 | 718 |

^A Tolerância da força $\pm 3\%$

1 kgf=9,806650N

ANEXO D- AVALIAÇÃO DA MÁQUINA

D.1 Planejamento dos experimentos

Para o teste da máquina, tanto no sistema mecânico, como no sistema instrumentado, se usou o método descrito pela norma ASTM G-65 para a interpretação dos resultados de perda de massa.

D.1.1 Relatório de resultados.

Depois do processo de pesagem calcula-se o valor do volume perdido, pela seguinte equação:

$$\text{Volume perdido } mm^3 = \frac{\text{Perda - de - massa (g)}}{\text{Densidade (g / cm}^3)} \times 1000$$

Também se calculam os valores de perda de volume ajustado, porque com o uso, o disco perde material, o diâmetro diminui e, portanto, a quantidade de abrasão também diminui ligeiramente. O valor da perda de volume ajustado é calculado pela seguinte equação:

$$\text{PAV} = \text{Perda de volume medida} \times \frac{228,6 \text{ mm}}{\text{diâmetro do disco após o uso}}$$

Todos os dados obtidos devem ser reportados, tanto os dados do processo de calibração da máquina, como os dos ensaios subseqüentes. Qualquer variação deve ser descrita como comentários. Além disso, a máquina deve ser re-calibrada periodicamente.

Os principais parâmetros a serem considerados para uma alta repetição dos valores dados de perda de massa, dependem da homogeneidade do material, da homogeneidade do abrasivo, das características do disco, máquina em geral e das observações feitas por um bom operador. Um coeficiente de variação de valor abaixo de 7 % é o mais apropriado.

D.1.2 Considerações estatísticas sobre provas de abrasão na máquina ASTM G-65

Não somente se tem que ter precaução com o método do ensaio, o equipamento e o operador qualificado que gere resultados corretos é importante, os resultados devem ser repetitivos dentro de uma estreita faixa

aceitável. Outra importante consideração nos resultados de desgaste dos ensaios é a seleção adequada do tamanho de amostras para ensaios em materiais homogêneos a fim de obter resultados médios significativos. As técnicas estatísticas para a qualificação da máquina e dos ensaios são apresentadas a seguir.

D.1.2.1 Equações equivalentes

Algumas análises estatísticas são usadas para calcular a quantidade de ensaios apropriada, o desvio padrão e o coeficiente de variação, para desta forma ter certeza da confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio com areia seca / roda-de-borracha. O desvio padrão e o coeficiente de variação em ensaios feitos em uma série de provas podem ser calculados por meio das seguintes equações:

$$s = \text{Desvio padrão (Pequena quantidade de ensaios, 2 a 10)} = R / d_2. \quad (1)$$

$$s = \text{Desvio padrão (Qualquer quantidade de ensaios)} = \sqrt{(x - \bar{x})^2 / n - 1} \quad (2)$$

$$V = \% \text{ coeficiente de variação} = (s / \bar{x}) \times 100. \quad (3)$$

$$n = \text{Tamanho da mostra (95 \% nível de confiança)} = (1.96 V / e)^2 \quad (4)$$

$$R = \text{Diferença entre valores máximos e mínimos.} \quad (5)$$

Então:

s = Desvio padrão médio.

V = Variabilidade do procedimento da prova, (%).

X = Valor da perda de massa de cada resultado de prova (Volume perdido em mm³).

\bar{x} = Média aritmética para n provas.

Σx = Soma total de todos os valores da prova.

n = Número de provas ou observações.

e = Erro permissível (%).

d_2 = Fator de desvio, muda com o número de amostras ensaiadas (Tabela D. 1)

Tabela D. 1 - Fator para estimativa do desvio padrão a partir do número de ensaios

| Número de provas (n) | d_2 | $1/d_2$ |
|----------------------|-------|---------|
| 2 | 1,128 | 0,8865 |
| 3 | 1,693 | 0,5907 |
| 4 | 2,059 | 0,4857 |
| 5 | 2,326 | 0,4299 |
| 6 | 2,534 | 0,3946 |
| 7 | 2,704 | 0,3698 |
| 8 | 2,847 | 0,3512 |
| 9 | 2,970 | 0,3367 |
| 10 | 3,078 | 0,3249 |

D.1.2.2 Uso de métodos estatísticos

Nas análises de confiabilidade dos procedimentos de ensaio, os novos usuários devem tratar com conceitos de média, desvio padrão da média, variação dos resultados, faixa de resultados, erro permissível do número de ensaios e particularmente os efeitos da quantidade de ensaios. É óbvio que um grande número de ensaios realizados é desejável, o que produzirá um alto nível de confiança na análise dos resultados. Com pequena quantidade de ensaios, pode-se calcular a variabilidade dos resultados, os quais podem gerar uma indicação da precisão do equipamento e do método de ensaio.

Considera-se de 2 a 10, pouca quantidade de ensaios. Na análise estatística para a estimativa do desvio padrão de um grande número de ensaios (Mais de 10), é derivado da raiz quadrada da média ao quadrado do desvio da média. Para uma quantidade menor que 10 ensaios, o desvio padrão (s) é mais eficiente derivado da faixa (R). Para esta quantidade de ensaios o desvio padrão é obtido multiplicando a faixa da observação disponível (a diferença entre os valores numéricos, máximo e mínimo) por um fator de desvio (Equação 1) que muda com o número de ensaios.

Na Tabela D. 2, apresentam-se os valores de número de ensaios para um nível de confiança de 95 %; os valores dados dependem do valor do coeficiente de variação e do valor de erro permissível calculado a partir dos valores de perda de massa corrigida.

Tabela D. 2 - Quantidade mínima aceitável de ensaios (n) (norma ASTM G-65)

| Coeficiente de variação (%) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Erro permissível dos ensaios (e) | | | | | | | | | |
| 1 | 4 | 1 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | 16 | 4 | 2 | 1 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 35 | 9 | 4 | 3 | 2 | 1 | --- | --- | --- |
| 4 | 62 | 16 | 7 | 4 | 3 | 2 | 2 | --- | --- |
| 5 | 96 | 24 | 11 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 6 | --- | 35 | 16 | 9 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 7 | --- | 47 | 21 | 12 | 8 | 6 | 4 | 3 | 2 |
| 8 | --- | 62 | 28 | 16 | 10 | 7 | 5 | 4 | 3 |
| 9 | --- | 78 | 35 | 20 | 13 | 9 | 7 | 5 | 4 |
| 10 | --- | 96 | 43 | 24 | 16 | 11 | 8 | 6 | 4 |

ANEXO E- CÁLCULOS PARA APLICAÇÃO DA FORÇA NORMAL NO SISTEMA MECÂNICO

Na Figura E. 1, pode ser observado o diagrama de forças para o dispositivo de aplicação da força no sistema de braço de alavanca.

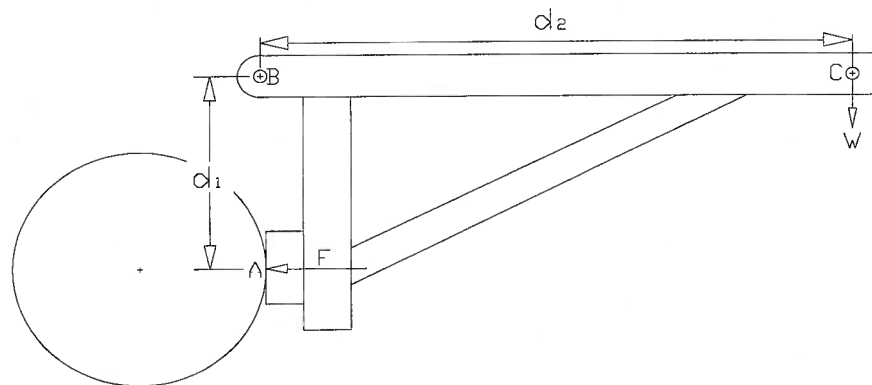


Figura E. 1 - Diagrama de forças do braço de alavanca da máquina para ensaios de desgaste

Segundo a norma ASTM G-65, o abrasômetro tem que ser testada para saber o nível de confiabilidade, para isto se aplica uma força de 130 N sobre o corpo-de-prova, mas como o dispositivo para a aplicação da força é por sistema de braço de alavanca, tem-se que calcular quanto deve ser a força W aplicada no ponto C do braço para obter a força requerida no ponto A.

A continuação, apresenta-se os cálculos de momentos de acordo com a Figura E. 1.

$$d_1 = \text{distância} = 203,2 \text{ mm}$$

$$d_2 = \text{distância} = 508 \text{ mm}$$

As forças estabelecidas pela norma ASTM G-65 como parâmetros para os testes segundo a Tabela C. 1 são as seguintes:

$$F_1 = \text{força} = 130 \text{ N para o teste tipo A, B, C e E.}$$

$$F_2 = \text{força} = 45 \text{ N Para o teste tipo D.}$$

$$\phi_{\text{DISCO.}} = \text{diâmetro do disco} = 228,6 \text{ mm}$$

$$\text{Espessura} = 12,7 \text{ mm}$$

M_{B1} = momento em B = $F_1 \times d_1$ = força por distância

$$M_{B1} = 13,25 \text{ kg} \times 0,2032 \text{ m}$$

$$M_{B1} = 2,692 \text{ N}$$

$$W_1 = \frac{M_{B1}}{d_2} = \text{força}$$

$$W_1 = \frac{2,692 \text{ mm}}{0,508 \text{ mm}}$$

$$\underline{W_1 = 5,30 \text{ kg}}$$

$$M_{B2} = F_2 \times d_1$$

$$M_{B2} = 4,587 \text{ kg} \times 0,2032 \text{ m}$$

$$M_{B2} = 0,9320 \text{ N}$$

$$W_2 = \frac{M_{B2}}{d_2}$$

$$W_2 = \frac{0,932 \text{ N}}{0,508 \text{ m}}$$

$$\underline{W_2 = 1,835 \text{ kg}}$$

Por tanto, para o material ensaiado e recomendado pela norma para a padronização do abrasômetro tipo roda-de-borracha se requer pendurar no ponto C do sistema braço/alavanca uma carga de 5,30 Kg, para de esta forma obter sobre o corpo-de-prova uma carga aplicada de 130 N.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIN 50320 Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste, *Metalurgia & Materiais*, 53, 1997, p619-622.
- Eyre, T. S. Friction and wear mechanisms of metals, In: II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia, ABM 1991, **Anais**, p.263-292.
- Borik, F., Using test to define the influence of metallurgical variables on abrasion, **Metal Engineering Quarterly**, 1972, p. 33-39.
- Haworth, R.D. The Abrasion Resistance of Metals. In: ASM. 1948, pp. 819-855.
- ASTM G-65-94 American Standard for Testing Materials. Measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, G02.30, ASTM, 1994, p.239-250.
- Célula de carga tipo A-50 fabricada pela Alfa instrumentos. (especificações dimensionais, 2000 disponível em: www.alfainstrumentos.com.br. Acesso em 8 de fev. 2005.
- Zum Gahr, K-H. **Microstructure and wear of materials**, New York: Elsevier, 1987, v.10. (Tribology series).
- ASTM G-40 American Standard for Testing Materials. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, V03.02, ASTM, 1992, p.158-163.
- Tylczak, J.H.; Orenson, A. Abrasive wear. In: **ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology**. 1992, v.18. p.184-190.
- Hutchings, I.M. Tribology. **Friction and wear of engineering materials**, London: Edward Arnol, 1992. 273p.
- Avery, H.S. Classification and precision of abrasion tests. In: International Conference on Wear of Materials, Saint Louis, MO, USA, 1977. **Proceedings**. p.148-157.
- Misra, A; Finnie, I.; A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester, **Wear**, v.60, n.1, p.111-121, 1980.
- Rigaut, B.; Pavy, J.C. **Rapport final du contract CCPR 641991**. Paris: CETIM, 1981. (Relatório técnico). 76p.
- ASTM G-99 American Standard for Testing Materials. Standard Test Method for Wear Testing With s Pin-on-Disk Apparatus, V03.02: Wear and Erosion; Metal Corrosion Philadelphia, USA 2001.
- ASTM G-81 American Standard for Testing Materials. Practice for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test, V03.02, ASTM, 1992, p332-7.

-
- Budinski, K.G.; Eeatman Kodak Company. Laboratory testing methods for solid friction. In: **ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology**. 1992, v.18. p.45-58.
- Stevenson, A.N.J.; Hutchings, I.M. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. **Wear**, v.195, n.1-2, p.232-240, 1996.
- Franco, S.D.; Zumpano Jr., P.; de Mello, J.D.B. Abordagem global do estudo do processo abrasivo. Parte II - desenvolvimento e avaliação de abrasômetro a dois e três corpos. In: I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste. São Paulo, 1989. **Anais**. São Paulo: ABM, 1989. p.47-62.
- Zumpano Jr., P.; Cornachioni, D.D.; de Mello, J.D.B. Abordagem global do estudo do processo abrasivo. Parte III - desenvolvimento e avaliação de abrasômetro a dois e três corpos. In: I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste. São Paulo, 1989. **Anais**. São Paulo: ABM, 1989. p.63-76.
- Gates, J. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. **Wear**, v.214, n.1, p.139-146, 1998.
- Murilo, R. Estudo do desgaste por abrasão e projeto de um abrasômetro do tipo roda de borracha, São Paulo, 1999. 36p.
- Nathan, G.K; Jones, W.J.D. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions. **Wear**, v.9, n.4, p.300-309, 1966.
- Misra, A.; Finnie, I. On the size effect in abrasive and erosive wear. **Wear**, v.65, n.3, p.359-373, 1981.
- Pintaúde, G.; Tanaka, D.K.; Sinatora, A. Effect of indentation size and microhardness calculation on abrasive wear severity. **Scripta Materialia**, v.44, p.659-663, 2001.
- Oliver, W.C.; Pharr, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. **Journal of material research**, v.7, n.6, p.1564-1583, 1992.
- Pintaúde, G.; Tanaka, D.K.; Sinatora, A. The effects of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on-disk apparatus. **Wear**, v.255, n.1-6, p.55-59, 2003.
- Haworth Jr., R.D. The abrasion resistance of metals. **Transactions of the A.S.M**, v.41, p.819-855, 1948.
- Pintaúde, G. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**. 2002. 200p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- Pintaúde, G.; Sinatora, A. Influência do tamanho de partículas abrasivas no coeficiente de atrito cinético de aços com diferentes durezas. **Boletim**

técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PME/0302, 2003.
Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

ABNT NBR 6401 Instalações centrais de ar condicionado para conforto -
Parâmetros básicos de projeto, dezembro de 1980.

ABNT NBR 7214 Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982.; Areia
normal para ensaio de cimento, 1982, p.7.

Mesa, D. **Propriedades mecânicas e de superfície de aços inoxidáveis
martensíticos de alto nitrogênio**. 2001. 102p. Dissertação (Mestrado) -
Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

De Mello, J.D.B. Abordagem global do estudo do processo abrasivo. Parte I -
desenvolvimento e avaliação de abrasômetro a dois e três corpos. In: I
Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste. São Paulo, 1989. **Anais**.
São Paulo: ABM, 1989. p.29-45.

Shigley, J.E; Mischke CH.R. **Diseño en ingeniería mecánica**. 5.ed. España:
Mc Graw Hill, 1997. 883p.