

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**KARLA DUBBERSTEIN TOZETTI**

**EFEITO DA CARGA E DO TAMANHO DO GRÃO ABRASIVO NO DESGASTE DO  
FERRO FUNDIDO BRANCO 19,9 % CROMO E 2,9 % CARBONO**

**VITÓRIA - ES  
2013**

**KARLA DUBBERSTEIN TOZETTI**

**EFEITO DA CARGA E DO TAMANHO DO GRÃO ABRASIVO NO DESGASTE DO  
FERRO FUNDIDO BRANCO 19,9 % CROMO E 2,9 % CARBONO**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Albertin

**VITÓRIA - ES  
2013**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**“Efeito da Carga e do Tamanho do Grão Abrasivo no Desgaste do Ferro  
Fundido Branco 19,9 % Cromo e 2,9 % Carbono”**

**KARLA DUBBERSTEIN TOZETTI**

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Cherlio Scandian - Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Prof. Dr. Eduardo Albertin - Co-Orientador**  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

---

**Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

---

**Prof. Dr. Flávio José da Silva**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória (ES), 01 de Abril de 2013.

*“Great things are done by a series of small things brought together”*

Vincent Van Gogh

## DEDICATÓRIA

*À Elizabeth Dubberstein*

## AGRADECIMENTOS

Difícilmente é possível realizar qualquer trabalho sem a ajuda de alguém, por isso uso esse espaço para agradecer as pessoas que auxiliaram no desenvolvimento dessa dissertação:

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos membros da banca Dr. Giuseppe Pintaúde da UTFPR e Dr. Flávio José da Silva da UFES pela avaliação desse trabalho.

Ao professor orientador Dr. Cherlio Scandian do PPGEM/UFES pela sugestão e auxílio. Gostaria de agradecer os momentos de conversa, pelos ensinamentos e assim demonstrar todo meu respeito e admiração.

Ao professor co-orientador Dr. Eduardo Albertin do IPT/SP por todo seu interesse, consideração e conhecimento compartilhado durante a realização deste trabalho. E pelo trabalho realizado com tanto rigor e cuidado na fundição e tratamento térmico da liga no IPT/SP.

Ao professor Dr. Amilton Sinatora da escola politécnica da USP pela doação das lixas de granada de 220# e 100# para a realização os ensaios pino sobre lixa.

Ao professor Dr. Flávio José da Silva pelo conhecimento disponibilizado na parte específica e pela dedicação. E, ao técnico do laboratório de tecnologia mecânica da UFES, LABTECMEC, pelo cuidado na retificação das amostras.

Ao Me. Gustavo Amaral pelo auxílio nos ensaios roda-de-borracha.

Aos engenheiros Péricles e Sócrates da Reval Metal Mecânica (Serra/ES) pela disponibilização da máquina de corte por eletroerosão a fio para confecção das amostras do ensaio roda-de-borracha e pino sobre lixa.

À professora Dr. Geilma Lima Vieira, responsável pelo laboratório LEMAC/UFES, pela disponibilização do peneirador, das peneiras e do granulômetro a laser. Agradecer, principalmente, aos técnicos do laboratório Sr. Loriato e Henrique do LEMAC/UFES pelas sugestões e boa vontade. E, também, ao agrolab de Vila Velha/ES pela disponibilização da peneira de 140 mesh.

Ao Professor Dr. Washington Martins da UFU por me receber no laboratório (LTM/UFU) para os ensaios no pino sobre lixa.

À doutoranda da UFU, Regina Paula, por me receber em sua casa durante a estada em Uberlândia.

Ao Professor Dr. Sinésio Domingues Franco da UFU pela doação das lixas de sílica de 220# e 80# para realização dos ensaios pino sobre lixa.

Ao Técnico de laboratório Nishida, pela obtenção das micrografias com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do LCSM/UFES.

Ao eng. Leandro Entringer Falqueto pela obtenção das topografias das superfícies com o analisador tridimensional de superfícies do LCSM/UFES.

Ao mestrando Luiz Rafael Rezende da Silva e ao Abraão Caldas do TRICORRMAT/UFES pela ajuda na obtenção de dureza Rockwell C e Vickers da liga de FFBAC.

À técnica de laboratório Ângela M. S. Andrade pela obtenção das durezas Rockwell C e Vickers no LTM/UFU.

## RESUMO

No trabalho foi investigado o efeito da carga e do tamanho da partícula abrasiva na resistência ao desgaste da liga de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC) com composição química de 2,9% de carbono e 19,9% de cromo em massa. A microestrutura da liga é composta por uma matriz de martensita revenida a 200 °C com carboneto eutético. No ensaio abrasivo pino sobre lixa foram utilizadas lixas de sílica e de granada como abrasivo, com três granulometrias distintas: 63  $\mu\text{m}$ , 149  $\mu\text{m}$  e 177  $\mu\text{m}$ , sob a aplicação de duas cargas: 5 N e 10 N. Em abrasão no roda-de-borracha utilizou-se como abrasivo a areia normal brasileira (ANB) com três tamanhos médios: 87  $\mu\text{m}$ , 115  $\mu\text{m}$  e 170  $\mu\text{m}$  e três cargas: 44 N, 80 N e 130 N. As superfícies de desgaste foram analisadas com um analisador tridimensional de superfícies e os micromecanismos de desgaste foram caracterizados usando microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram, de maneira geral, um aumento no volume perdido no desgaste com o aumento da carga e do tamanho da partícula abrasiva e permitiram, para a roda-de-borracha, a observação de um tamanho crítico do abrasivo. No ensaio pino sobre lixa de sílica, para o maior tamanho de abrasivo, o volume perdido no desgaste triplicou com o aumento da carga de 5 N para 10 N.

**Palavras-chave:** ferro fundido branco alto cromo, tamanho da partícula abrasiva, carga, desgaste abrasivo, pino sobre lixa, roda-de-borracha.

## ABSTRACT

In this research, the effects of different applied load and abrasive size on the martensitic high-chromium white cast iron (with a chemical composition: 2,9% carbon and 19,9% chromium) abrasive wear was investigated. The alloy's microstructure consists of: a matrix martensite tempered at 200 ° C with eutectic carbide. Abrasive wear tests using a pin test on silica and garnet paper were carried out using three different abrasives sizes: 63 µm, 149 µm e 177 µm and two applied load: 5 N e 10 N. And the rubber wheel abrasion test (ASTM standard G-65) was carried out using three abrasives sizes: 87 µm, 115 µm e 170 µm and three distinct applied loads: 44 N, 80 N e 130 N. The specimens wear surface was examined by scanning electron microscopy (SEM) for identifying the wear mechanism. The rubbers wheel abrasion test results show that: the mass loss of the white cast iron alloy increases linearly with the increase of particle size until the critical particle size is reached. In pin test on silica paper, to the largest abrasive size, the lost volume in abrasion tripled with applied load increasing of 5 N to 10 N. In general, the mass loss increases with the increase of the load applied and the abrasive size.

**Keywords:** High-chromium white cast iron, abrasive size, load, abrasive wear, pin on disc, rubber wheel.

# Sumário

<b>RESUMO</b> .....	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>xviii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Conteúdo.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1. Desgaste abrasivo.....	4
2.2. Mecanismos de desgaste abrasivo.....	4
2.3. Parâmetros que influenciam o desgaste abrasivo .....	5
2.3.1. <i>O efeito da carga no desgaste</i> .....	6
2.3.2. <i>O efeito do tamanho da partícula abrasiva no desgaste</i> .....	8
2.4. Mapa de desgaste .....	14
2.5. Ferro fundido branco alto cromo (FFBAC).....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
3.1. Material: FFBAC .....	23
3.1.1. <i>Tratamento térmico da liga de FFBAC</i> .....	24
3.1.2. <i>Composição química e análise microestrutural da liga de FFBAC</i> .....	25
3.1.3. <i>Medidas de dureza</i> .....	27
3.1.4. <i>Durezas dos componentes do FFBAC e dos abrasivos</i> .....	27
3.2. Ensaio: roda-de-borracha.....	28
3.2.1. <i>Usinagem da amostra: roda-de-borracha</i> .....	32
3.2.2. <i>Areia normal brasileira</i> .....	33
3.2.3. <i>Carga normal: roda-de-borracha</i> .....	34
3.2.4. <i>Revestimento de borracha</i> .....	35
3.2.5. <i>Procedimento para limpeza dos corpos-de-prova</i> .....	35
3.3. Ensaio: pino sobre lixa .....	36

3.3.1.	<i>Confecção da amostra: pino sobre lixa</i> .....	38
3.3.2.	<i>Lixas</i> .....	40
3.3.3.	<i>Carga normal: pino sobre lixa</i> .....	40
3.4.	Análise topográfica das superfícies .....	41
3.5.	Caracterização dos micromecanismos de desgaste .....	41
<b>4.</b>	<b><i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i></b> .....	<b>42</b>
4.1.	Resultados dos ensaios de dureza do FFBAC.....	42
4.2.	Ensaio: roda-de-borracha.....	43
4.2.1.	<i>Caracterização da superfície</i> .....	43
4.2.2.	<i>Areia normal brasileira</i> .....	43
4.2.3.	<i>Resultados dos ensaios: roda-de-borracha</i> .....	49
4.2.4.	<i>Mecanismos de desgaste: roda-de-borracha</i> .....	52
4.2.5.	<i>Rugosidade das superfícies: roda-de-borracha</i> .....	55
4.3.	Ensaio: pino sobre lixa .....	58
4.3.1.	<i>Caracterização da superfície</i> .....	58
4.3.2.	<i>Resultados dos ensaios: pino sobre lixa</i> .....	59
4.3.3.	<i>Mecanismos de desgaste: pino sobre lixa</i> .....	61
4.3.4.	<i>Rugosidade das superfícies: pino sobre lixa</i> .....	66
4.4.	Mapa de desgaste .....	69
<b>5.</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i></b> .....	<b>72</b>
<b>6.</b>	<b><i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES</i></b> .....	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b> .....	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b><i>ANEXOS</i></b> .....	<b>80</b>
8.1.	Anexo A: Ensaio de desgaste abrasivo na roda-de-borracha.....	80
8.1.1.	<i>Procedimento recomendado pela norma ASTM G-65</i> .....	81
8.2.	Anexo B: Cálculo e apresentação dos resultados: ASTM G-65 .....	83
8.2.1.	<i>Equações para o Volume Perdido</i> .....	83
8.2.2.	<i>Equações estatísticas para o cálculo do coeficiente de variação</i> .....	83
8.3.	Anexo C: Dados experimentais ensaio de desgaste roda-de-borracha .....	85
8.4.	Anexo D: Dados experimentais ensaio de desgaste pino sobre lixa.....	94
8.5.	Anexo E: Cálculo das taxas de desgaste parametrizadas.....	102

## Lista de Figuras

<i>Figura 2-1 - Representação esquemática dos mecanismos de desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de ZUM GAHR, 1987.</i>	5
<i>Figura 2-2 - Parâmetros do sistema tribológico que influenciam o desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de ZUM GAHR, 1987.</i>	6
<i>Figura 2-3 - Relação entre a perda de massa e a carga aplicada para o ferro fundido com diferentes teores de cromo e vanádio. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2009a.</i>	7
<i>Figura 2-4 – Relação, esquemática, da taxa de desgaste com a variação do tamanho da partícula abrasiva. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2011a.</i>	9
<i>Figura 2-5 - Relação entre a perda de massa no desgaste com a variação da partícula abrasiva na erosão e no desgaste abrasivo com deslizamento e com rolamento de partículas abrasivas. Fonte: adaptado de MISRA e FINNIE, 1981b.</i>	10
<i>Figura 2-6 - Relação entre a perda de massa e o tamanho de abrasivo para o ferro fundido branco com matriz austenítica e diferentes distancias de deslizamento. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2011a.</i>	12
<i>Figura 2-7 - Relação entre a perda de massa e o tamanho de abrasivo para o ferro fundido branco com matriz austenítica e martensítica. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2011a.</i>	13
<i>Figura 2-8 - Mapa de desgaste por deslizamento do ferro fundido cinzento A30 contra um aço AISI 52100 em função do logaritmo da carga e da velocidade de deslizamento. Destaque para as micrografias da superfície do ferro fundido mostrando os micromecanismos de desgaste para cada condição de ensaio. Fonte: Adaptado de RIAHI e ALPAS, 2003.</i>	16
<i>Figura 2-9 - Variáveis utilizadas para a definição do parâmetro <math>D_p</math> do abrasivo (<math>D_p = h/a</math>). Fonte: adaptado de HOKKIRIGAWA e KATO, 1988.</i>	17
<i>Figura 2-10 – Diagrama de mecanismo de desgaste abrasivo como função do grau de penetração (<math>D_p</math>) e da resistência ao cisalhamento na interface de contato. Fonte: adaptado de HOKKIRIGAWA e KATO, 1988.</i>	18
<i>Figura 2-11 – Mapa de desgaste para uma superfície macia deslizando sobre uma superfície com asperezas mais duras. As linhas mais grossas definem os contornos dos mecanismos de desgaste e as linhas mais finas representam as taxas de desgaste. Fonte: adaptado de WILLIAMS, 1999.</i>	19
<i>Figura 2-12 - Mapa de desgaste em função da carga e da velocidade para diferentes materiais, em (a) ferro fundido alto cromo; (b) HARDOX 400 e em (c) S235. Cada curva representa um índice de desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de JENSEN et al., 2010.</i>	20
<i>Figura 3-1 - (a) Molde utilizado para a fundição dos blocos de FFBAC. (b) Foto da peça bruta de fundição com os canais e massalotes.</i>	24
<i>Figura 3-2 – Curvas de resfriamento da têmpera. Em (a) Curva do ferro fundido branco contendo 2,93% C e 17,4 % Cr. Fonte: MARATRAY e USSEGLIO-NANOT (1970). Em (b) Curva de têmpera ao ar forçado aplicado à liga de ferro fundido branco alto cromo contendo 2,9% C e 19,9% Cr.</i>	25
<i>Figura 3-3 - Microestrutura do FFBAC com matriz martensítica e carbonetos. A parte mais clara é o eutético contendo carbonetos na matriz de martensita revenida (em E) e a região mais escura é martensita revenida (em M). Micrografia do ótico em (a) aumento de 100 vezes e em (b) 200 vezes.</i>	26
<i>Figura 3-4 – Fotografia do equipamento de ensaio de desgaste abrasivo roda-de-borracha do TRICORRMAT/UFES, em funcionamento.</i>	29

<i>Figura 3-5 – (a) Desenho ilustrativo da geometria dos corpos-de-prova para ensaios no roda-de-borracha, com medidas em milímetros. (b) Fotografia da amostra, após retífica nas dimensões 9 mm x 25 mm x 76 mm.</i>	32
<i>Figura 3-6 – Fotografia da máquina de corte por eletroerosão a fio utilizada para a usinagem das amostras para o ensaio roda-de-borracha da Reval Metal Mecânica Ltda (Serra/ES).</i>	33
<i>Figura 3-7 - Fotografia da roda-de-borracha, em funcionamento, detalhe da passagem do abrasivo na interfase do contato entre a amostra e o revestimento de borracha.</i>	35
<i>Figura 3-8 - Abrasômetro pino sobre lixa. (a) Fotografia do abrasômetro pertencente ao LTM/UFU. (b) Desenho esquemático do ensaio de desgaste pino sobre lixa.</i>	36
<i>Figura 3-9 – Máquina de usinagem por eletroerosão por penetração utilizada para a usinagem dos pinos do ensaio pino sobre lixa, da Usicorte Usinagem de Metais Ltda (Serra/ES).</i>	39
<i>Figura 3-10 – (a) Fotografia do pino de ferro fundido branco à esquerda e da ferramenta de cobre à direita mostrando a abertura da ferramenta para o corte do pino. (b) Pino à esquerda e ferramenta de cobre à direita.</i>	39
<i>Figura 4-1 - Topografia da superfície gerada pelo analisador tridimensional de superfície da amostra de FFBAC para o ensaio no roda-de-borracha, após retifica.</i>	43
<i>Figura 4-2 - Distribuição granulométrica da areia peneirada. Em (a) areia “fina” com tamanho de partícula entre 30 <math>\mu\text{m}</math> e 142 <math>\mu\text{m}</math>, em (b) areia “média” com intervalo de 52 <math>\mu\text{m}</math> à 191 <math>\mu\text{m}</math> e em (c) areia “grossa” de 64 <math>\mu\text{m}</math> à 204 <math>\mu\text{m}</math>. Intervalo com 90% dos valores centrais.</i>	44
<i>Figura 4-3 - Micrografia do MEV com aumento de 400x dos abrasivos antes dos ensaios no roda-de-borracha em (a) a areia “grossa” com tamanho médio de 170 <math>\mu\text{m}</math>, (b) a areia “média” com tamanho médio de 115 <math>\mu\text{m}</math> e (c) a areia “fina” com tamanho médio de 90 <math>\mu\text{m}</math>.</i>	45
<i>Figura 4-4 - Micrografia da areia “fina” com tamanho médio de 90 <math>\mu\text{m}</math>. (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.</i>	46
<i>Figura 4-5 - Micrografia da areia “média” com tamanho médio de 115 <math>\mu\text{m}</math>. (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.</i>	47
<i>Figura 4-6 - Micrografia da areia “grossa” com tamanho médio de 170 <math>\mu\text{m}</math>. (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.</i>	48
<i>Figura 4-7 – Gráfico do volume perdido nos ensaios de desgaste realizados no equipamento roda-de-borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva.</i>	50
<i>Figura 4-8 - Gráfico do volume perdido no ensaio de desgaste abrasivo realizado no equipamento roda-de-borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva.</i>	50
<i>Figura 4-9 - Gráfico do desgaste medido em <math>\text{mm}^3/\text{N}</math>, nos ensaios roda-de-borracha, em função do tamanho da partícula abrasiva.</i>	51
<i>Figura 4-10 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “fina” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X.</i>	52
<i>Figura 4-11 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “média” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X.</i>	53

<i>Figura 4-12 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “grossa” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X. Em destaque nos círculos vermelhos estão os riscos mais profundos.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4-13 - Gráfico do parâmetro de rugosidade da superfície (Sq) em função do tamanho da partícula abrasiva e da carga normal aplicada para os ensaios no equipamento roda-de-borracha.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4-14 – (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastada após os ensaios realizados com a areia “grossa”: em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-15 - (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastadas após os ensaios realizados com a areia “média” em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4-16 - (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastadas após os ensaios realizados com a areia “fina” em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4-17 – Topografia da superfície retificada do pino de FFBAC utilizado para realização dos ensaios pino sobre lixa, obtida do analisador tridimensional de superfícies.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4-18 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal, do tamanho da partícula abrasiva e do material da lixa.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4-19 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal e tamanho da partícula abrasiva. Lixa de granada. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4-20 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal e tamanho da partícula abrasiva. Lixa de sílica.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4-21 - Micrografias das superfícies dos pinos após realização de ensaios de desgaste pino sobre lixa de granada. Em (a) lixa de granulometria 220# (63 µm) e carga normal de 5 N; em (b) lixa 220# e carga de 10 N; em (c) lixa 100# (149 µm) e carga de 5 N e em (d) lixa 100# e carga de 10 N. Aumento de 800X. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4-22 - Micrografias da superfície do pino após ensaio de desgaste pino sobre lixa de sílica. Em (a) lixa de granulometria 220# (63 µm) e carga normal de 5 N; em (b) lixa 220# e carga de 10 N; em (c) lixa 80# (177 µm) e carga de 5 N e em (d) lixa 80# e carga de 10 N. Aumento de 800X.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4-23 – Gráfico do parâmetro de rugosidade (Sq) das superfícies desgastadas dos pinos do ensaio pino sobre lixa em função do material, do tamanho do abrasivo e da carga normal. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4-24 - Topografia das superfícies desgastadas no ensaio pino sobre lixa de sílica com granulometria de 220# (63 µm) e carga normal: (a) 5 N e (b) 10 N. Granulometria de 80# (177 µm) e carga normal: (c) 5 N e (d) 10 N. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4-25 - Topografia das superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de granada com granulometria de 220# (63 µm) e carga normal: (a) 5 N e (b) 10 N. Granulometria de 100# (149 µm) e carga normal: (c) 5 N e (d) 10 N.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4-26 – Mapa de desgaste abrasivo do FFBAC 19,9% Cr e 2,9% C, para ensaios com dois níveis distintos de severidade, variando a carga normal e o tamanho da partícula abrasiva. Destaque para as micrografias das superfícies desgastadas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 8-1 – Desenho, esquemático, do abrasômetro tipo roda-de-borracha desenvolvido por Hutchings e Steverson. Fonte: adaptado de HUTCHINGS e STEVERSON, 1996. ....</i>	<i>80</i>

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 3-1 - Composição química analisada da liga de ferro fundido branco alto cromo. Porcentagem em peso dos principais componentes da liga e dos componentes residuais.</i> .....	26
<i>Tabela 3-2 - Composição química da austenita antes do resfriamento, estimativa feita utilizando o software Thermo-Calc.</i> .....	27
<i>Tabela 3-3 – Valores de dureza Vickers dos abrasivos utilizados nos ensaios, da matriz martensítica, dos carbonetos (<math>Cr_7C_3</math>) e do carbeto de silício (SiC).....</i>	28
<i>Tabela 3-4 – Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios no equipamento roda-de-borracha, seguindo o procedimento A da Norma ASTM G-65.</i> .....	31
<i>Tabela 3-5 – Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste abrasivo pino sobre lixa.....</i>	38
<i>Tabela 4-1 – Durezas e microdurezas medidas nas amostras nas escalas Vickers e Rockwell C.</i> .....	42
<i>Tabela 4-2 - Classificação dos intervalos de tamanho da partícula abrasiva.</i> .....	44
<i>Tabela 4-3 - Fator de esfericidade das partículas abrasivas antes da realização dos ensaios e após os ensaios com carga de 130 N.....</i>	49
<i>Tabela 4-4 - Tabela de densidades de riscos nas superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de granada. Ensaio em lixa de 220# e carga normal de 5 N; com lixa de 100# e carga de 10 N, relativas às micrografias da figura 4.22 (a) e (d), respectivamente</i> .....	63
<i>Tabela 4-5 - Tabela de densidades de riscos nas superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de sílica. Ensaio em lixa de 220# e carga normal de 5 N; e, em lixa de 80# e carga de 10 N, relativas às micrografias da figura 4.23 (a) e (d), respectivamente.</i> .....	65
<i>Tabela 4-6 - Tabela para comparação de densidades, larguras e comprimentos dos riscos das superfícies desgastadas em ensaio pino sobre lixa, para a lixa de sílica e a lixa de granada. Relativas às micrografias da figura 4.23 (a) e (d) e figura 4.22 (a) e (d).</i> .....	66
<i>Tabela 8-1 - Peso das anilhas utilizadas para aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova.</i> .....	81
<i>Tabela 8-2 - Parâmetros de ensaio da norma ASTM G-65.....</i>	82
<i>Tabela 8-3 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga normal de 44 N e areia "fina".</i> .....	85
<i>Tabela 8-4 - Valores medidos de perda de massa em grama e valores calculados de volume perdido em <math>mm^3</math>, no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de 80 N de carga normal e areia de granulometria "fina".</i> .....	86
<i>Tabela 8-5 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação da carga de 130 N e areia "fina".</i> .....	87
<i>Tabela 8-6 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga normal de 44 N e areia "média".</i> .....	88
<i>Tabela 8-7 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "média".</i> .....	89

<i>Tabela 8-8 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "média".....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 8-9 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 44 N e areia "grossa".....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 8-10 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 80 N e areia "grossa".....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 8-11 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "grossa".....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 8-12 - Valores medidos da massa e do volume perdido no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de sílica de 220#.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 8-13 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de sílica de 220#.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 8-14 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de sílica de 80#.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 8-15 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lxa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de sílica de 80#.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 8-16 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de granada de 220#.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 8-17 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de granada de 220#.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 8-18 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre ixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de granada de 100#.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 8-19 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de granada de 100#.....</i>	<i>101</i>

## **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

CMM: Composto de matriz metálica

FFB: Ferro fundido branco

FFBAC: Ferro fundido branco de alto cromo

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

LABTECMEC/UFES: Laboratório de Tecnologia Mecânica

LCSM/UFES: Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais

LEMAC/UFES: Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção

LTM/UFU: Laboratório de Tribologia e Materiais

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

MWT: Micro-Wear Tester

NBR: Norma Brasileira

PPGM/UFES: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

TCA: Tamanho crítico do abrasivo

TRICORRMAT/UFES: Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais

UFES: Universidade Federal do Espírito Santo

UFU: Universidade de Uberlândia

USP: Universidade de São Paulo

## Lista de Símbolos

a: raio de contato

$d_{10}$ : tamanho relativo que corresponde a 10%do total do material passante ( $\mu\text{m}$ )

$d_{90}$ : tamanho relativo que corresponde a 90%do total do material passante ( $\mu\text{m}$ )

Dp: grau de penetração do abrasivo

$f$ : parâmetro relacionado com a resistência ao cisalhamento na interfase de desgaste

$f_e$ : fator de esfericidade

h: profundidade de penetração

HRC: dureza Rockwell escala C

HV: dureza Vickers

K: carboneto

#: Mesh

$\mu\text{m}$ : micrômetro

N: Newton

Sa: parâmetro de rugosidade superficial média ( $\mu\text{m}$ )

Sq: parâmetro de rugosidade superficial ( $\mu\text{m}$ )

W: carga normal (N)

# 1. INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo tem significativa importância na indústria de beneficiamento de minérios, na indústria siderúrgica, metalúrgica e também na agricultura e nos processos de movimentação e remoção de terra.

Com o intuito de quantificar a importância do desgaste para a indústria, eis um dado quantitativo das perdas com desgaste: estimativa econômica feita em 1992. Essa estimativa mostrou que cerca de 1% a 6% do produto interno bruto dos países desenvolvidos é perdido com desgaste, e ainda que cerca de 20% desses gastos poderiam ser evitados com a aplicação na indústria dos conhecimentos já existentes sobre tribologia (JOST, 1990).

Então, uma constatação que se pode fazer é: para controlar as perdas com desgaste, primeiramente, é preciso investir em pesquisas na área de tribologia para aprimorar o conhecimento sobre as possíveis interações entre abrasivo e superfície desgastada e depois aplicar esse conhecimento adquirido na indústria.

É importante, também, destacar que o desgaste não é um fenômeno com resultados facilmente previsíveis, pois depende de todo o sistema tribológico no qual está inserido sendo, portanto, influenciado pelas diversas variáveis desse sistema. Dentre essas variáveis podem-se citar: a dureza, a tenacidade à fratura e a microestrutura do material desgastado; a carga normal aplicada; a dureza, a forma e o tamanho da partícula abrasiva (ZUM GAHR, 1987).

Para a melhor seleção de materiais e condições de operação, é útil o acesso às informações sobre os efeitos de cada uma das variáveis no desgaste, e uma

forma de acessar e de armazenar essas informações pode ser feita com o uso de um mapa de desgaste (LIM, 1998).

Diante do exposto acima, o objetivo dessa dissertação é contribuir com o melhor entendimento das características de um mapa de desgaste abrasivo e, assim, desenvolver um mapa de desgaste observando os efeitos da variação da carga e do tamanho da partícula abrasiva. Para tanto, foram realizadas duas séries de ensaios de abrasão com diferente nível de severidade.

A primeira série de ensaios de desgaste foi executada no equipamento roda-de-borracha aplicando três diferentes cargas e três tamanhos de abrasivo.

A segunda série de ensaios (mais severa) foi executada no equipamento pino sobre lixa utilizando duas cargas diferentes, dois tipos de lixa e três tamanhos de partícula abrasiva.

Para a construção desse mapa de desgaste foi selecionada uma liga de ferro fundido branco martensítica revenida com 19,9% Cr e 2,9% C. A liga de ferro fundido branco alto cromo é conhecida por ter excelente desempenho no desgaste.

### *1.1. Conteúdo*

O conteúdo do trabalho esta organizado da seguinte forma:

Inicia-se com uma revisão bibliográfica na qual é feita uma descrição teórica dos conhecimentos abordados na dissertação.

O capítulo seguinte é reservado à apresentação dos materiais e métodos. Essa parte contém a descrição dos materiais e dos procedimentos aplicados nos ensaios (pino sobre lixa e roda-de-borracha). Esse capítulo contém, também, os métodos de usinagem das amostras e como foi realizada a separação dos

tamanhos do abrasivo, bem como os procedimentos aplicados para a análise das superfícies após ensaio.

Posteriormente, são apresentados os resultados dos ensaios e as discussões dos mesmos. Seguem-se as conclusões consequentes dos resultados obtidos e, finalmente, são apresentadas algumas sugestões para outros estudos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desgaste abrasivo é um fenômeno altamente dependente do sistema tribológico. Para antever o comportamento de um material em desgaste é necessário conhecer o máximo sobre a influência de cada variável no processo. E, uma maneira de reunir e organizar essas variáveis e demonstrar a influência de cada uma na intensidade do desgaste pode ser efetuada utilizando um mapa de desgaste.

### 2.1. *Desgaste abrasivo*

O desgaste abrasivo pode ser definido como o desgaste devido às partículas duras ou asperidades da superfície de um contra-corpo mais duro deslizando sobre uma superfície mais macia, expondo ou removendo material (ZUM GAHR, 1987; 1998).

### 2.2. *Mecanismos de desgaste abrasivo*

O dano ou a remoção de material da superfície mais macia na abrasão acontece sob a forma de diferentes mecanismos de desgaste.

ZUM GAHR (1987) propôs quatro diferentes tipos de mecanismos de desgaste que resultam em fratura ou destacamento de material da superfície mais macia. A figura 2.1 ilustra, esquematicamente, os mecanismos descritos por Zum Gahr.

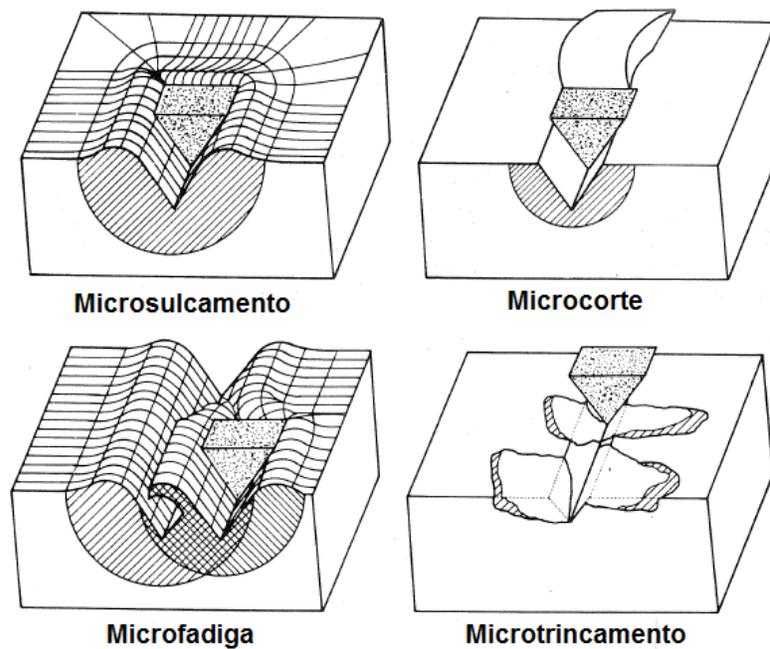


Figura 2-1 - Representação esquemática dos mecanismos de desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de ZUM GAHR, 1987.

O microsulcamento e a microfadiga são mecanismos de desgaste predominantes em regime de abrasão moderada. O microcorte e o microtrincamento, por sua vez, são mecanismos predominantes no regime de desgaste severo (GATES, 1998).

### 2.3. *Parâmetros que influenciam o desgaste abrasivo*

A resistência ao desgaste abrasivo não é uma propriedade intrínseca do material, mas é altamente dependente das características do tribosistema (ZUM GAHR, 1987).

A figura 2.2 adaptada do livro do ZUM GAHR (1987) apresenta os principais parâmetros que influenciam na perda de massa dos materiais em abrasão.

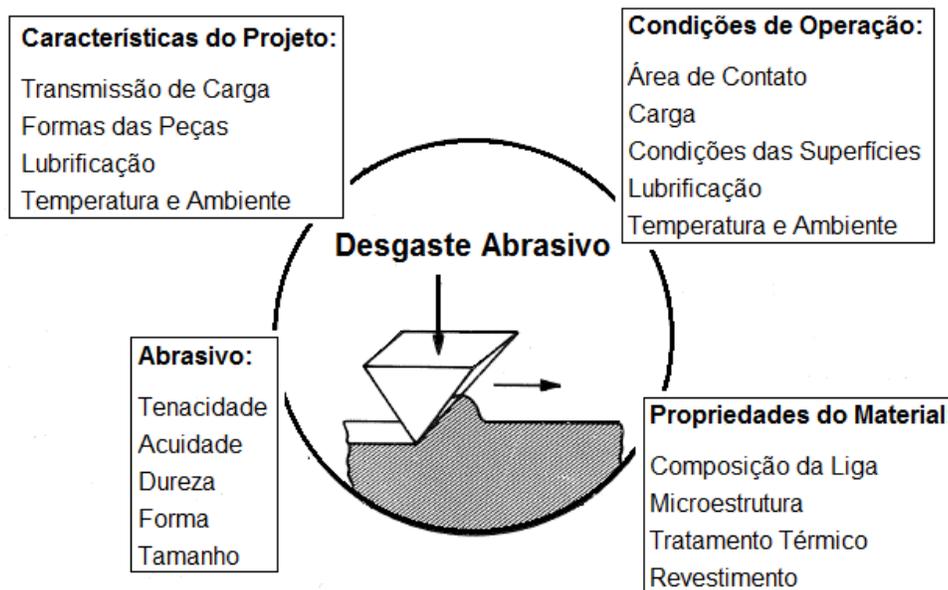


Figura 2-2 - Parâmetros do sistema tribológico que influenciam o desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de ZUM GAHR, 1987.

Das variáveis relacionadas acima na figura 2.2 a carga aplicada e o tamanho da partícula abrasiva exercem, sem dúvida, uma importância preponderante no desgaste. Sendo assim, o efeito dessas duas variáveis na abrasão será explorado nas próximas seções desse capítulo.

### **2.3.1. O efeito da carga no desgaste**

Em ensaios de desgaste abrasivo, realizados em materiais homogêneos ou mesmo naqueles com uma segunda fase dura foi observado aumento na perda de massa com o aumento da carga.

CORONADO e SINATORA (2009a) estudaram o efeito da carga no desgaste abrasivo de um material com segunda fase dura, eles ensaiaram um ferro fundido com grafita, cementita e diferentes teores de cromo e vanádio. Os ensaios foram realizados no equipamento de desgaste pino sobre lixa de alumina.

Os resultados obtidos estão na figura 2.3 e corroboram com o que é encontrado em ZUM GAHR (1987): que a perda de massa aumenta com o aumento da carga.

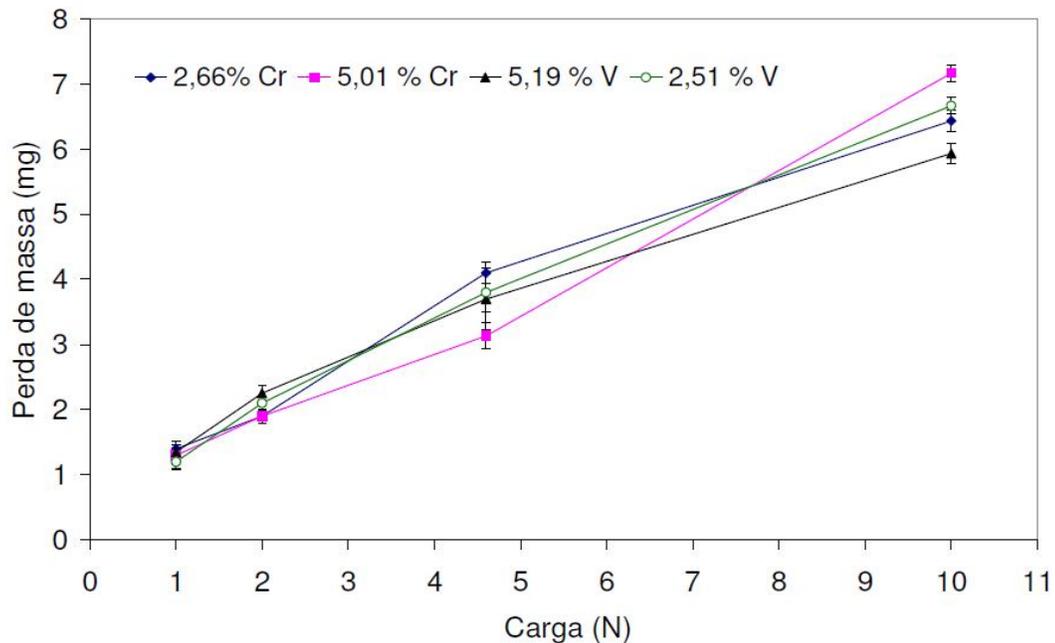


Figura 2-3 - Relação entre a perda de massa e a carga aplicada para o ferro fundido com diferentes teores de cromo e vanádio. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2009a.

Diversos autores estudaram o efeito da carga no desgaste abrasivo para materiais homogêneos, tais como NATHAN e JONES, 1966; MISRA e FINNIE, 1981a; HUTCHINGS E STEVENSON, 1996; VILLABÓN, 2005.

ZUM GARH (1987); CORONADO e SINATORA (2009a) estudaram os materiais heterogêneos.

Em todos os estudos foi encontrado crescimento do volume de material perdido no desgaste com o aumento da carga aplicada, crescimento nem sempre linear como previsto pela equação de Archard.

Uma explicação para o aumento do desgaste, encontrada em NATHAN e JONES (1966), é a seguinte: aplicando carga mais elevadas a profundidade de penetração é maior, o que pode causar maiores danos à superfície.

Já MISRA e FINNIE (1980) relacionaram o aumento na taxa de desgaste a maior restrição à movimentação dos abrasivos na interfase de desgaste quando aumenta a carga aplicada, predominando deslizamento à rolamento de partículas.

### **2.3.2. O efeito do tamanho da partícula abrasiva no desgaste**

O efeito do tamanho da partícula abrasiva no desgaste é mais complexo que o efeito da carga.

Reporta-se da literatura que o desgaste aumenta linearmente com o aumento do tamanho do abrasivo até um tamanho crítico (TCA) e, a partir desse tamanho o desgaste pode continuar crescendo com uma inclinação menor como ilustrado esquematicamente na curva (1) da figura 2.4 ou mantém-se constante como na curva (2) da figura ou diminui como na curva (3). Existem muitas hipóteses tentando explicar esse comportamento, mas ainda não existe uma explicação geral aceita por toda a comunidade científica. O fenômeno do TCA apresenta-se no desgaste abrasivo, na erosão e nos processos de usinagem por abrasão e corte (CORONADO e SINATORA, 2011a).

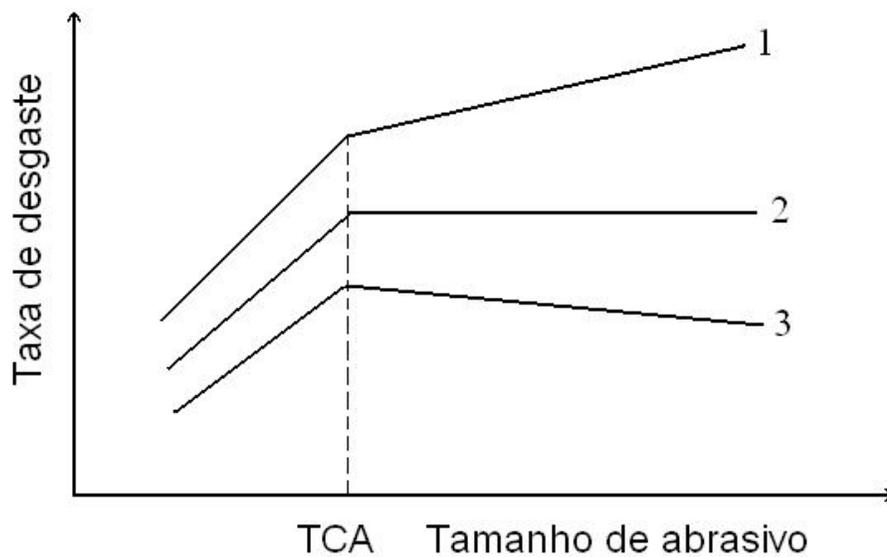


Figura 2-4 – Relação, esquemática, da taxa de desgaste com a variação do tamanho da partícula abrasiva. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2011a.

MISRA e FINNIE (1981b) em ensaios realizados com cobre e abrasivo de carbeto de silício (SiC) em desgaste abrasivo com deslizamento, rolamento de partículas e erosão encontraram um TCA de 100  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, mostrado na figura 2.5, comprovando a teoria do fenômeno do TCA. Uma explicação fornecida por Misra e Finnie foi a formação de uma camada próxima a superfície com maior deformação plástica que o restante do material, uma camada mais dura que impedia um aumento maior na taxa de desgaste.

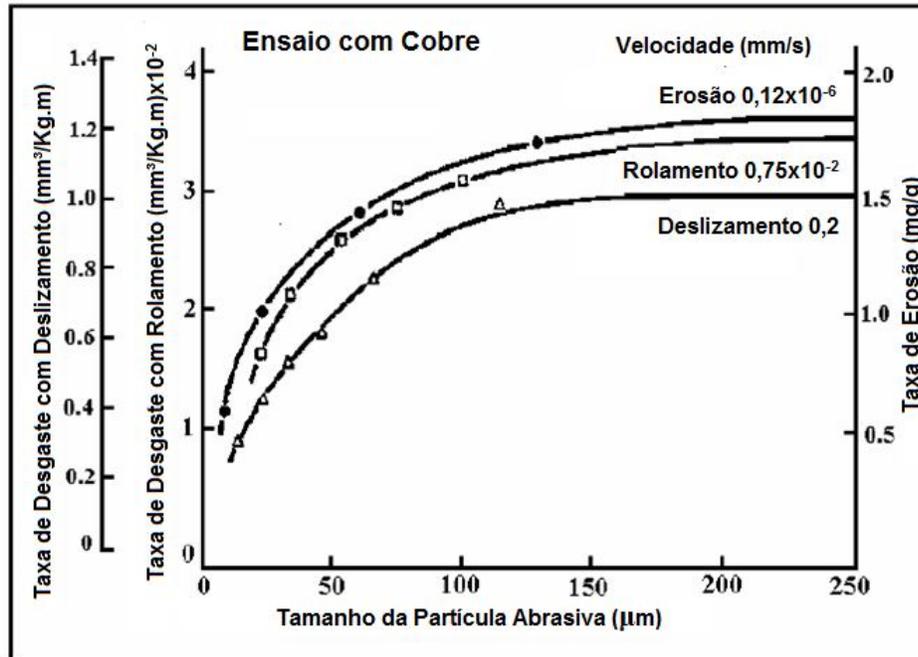


Figura 2-5 - Relação entre a perda de massa no desgaste com a variação da partícula abrasiva na erosão e no desgaste abrasivo com deslizamento e com rolamento de partículas abrasivas. Fonte: adaptado de MISRA e FINNIE, 1981b.

Foram realizados muitos estudos sobre o efeito da variação do tamanho do abrasivo em materiais homogêneos nos ensaios de abrasão e erosão, em alguns estudos como os de NATHAN e JONES, 1966; LARSEN-BADSE, 1972; MISRA e FINNIE, 1981b; SIN et al., 1979; CORONADO e SINATORA, 2011b foi observado o fenômeno do TCA para esses materiais.

Algumas explicações para o efeito do TCA dadas pelos autores citados anteriormente, foram: o *clogging* (entupimento das lixas pelas partículas menores, nos ensaios pino sobre lixa); maior probabilidade de formação de microsulcamento do que de microcorte quando o abrasivo é pequeno; abrasivos pequenos com pontas arredondadas resultando em menor desgaste; possibilidade de deterioração dos abrasivos maiores ou formação de uma camada superficial mais dura por

deformação plástica. Mas ainda não existe nenhuma explicação geral aceita por toda comunidade científica (MISRA e FINNIE, 1981b; CORONADO, 2010).

O estudo do desgaste em materiais com segunda fase dura é mais recente. Muitas pesquisas sobre o efeito do tamanho do abrasivo em materiais heterogêneos foram desenvolvidas com foco no ferro fundido branco (CORONADO, 2010).

CORONADO e SINATORA (2011a) realizaram ensaios em ferro fundido branco com o equipamento pino sobre lixa com abrasivo de alumina variando o tamanho do grão abrasivo entre 16  $\mu\text{m}$  e 192  $\mu\text{m}$  e mantendo a carga normal constante em 4,6 N.

A figura 2.6 mostra a relação entre a perda de massa e o tamanho do grão abrasivo para o ferro fundido branco com matriz austenítica. Nota-se no gráfico que a perda de massa aumenta linearmente com aumento do tamanho do abrasivo até um tamanho crítico de 36  $\mu\text{m}$ . Após o TCA a perda de massa continuou crescendo com o aumento do tamanho do abrasivo, porém em uma inclinação menor. Resultados equivalentes foram encontrados por SIN. et al., 1979; NATHAN e JONES, 1966.

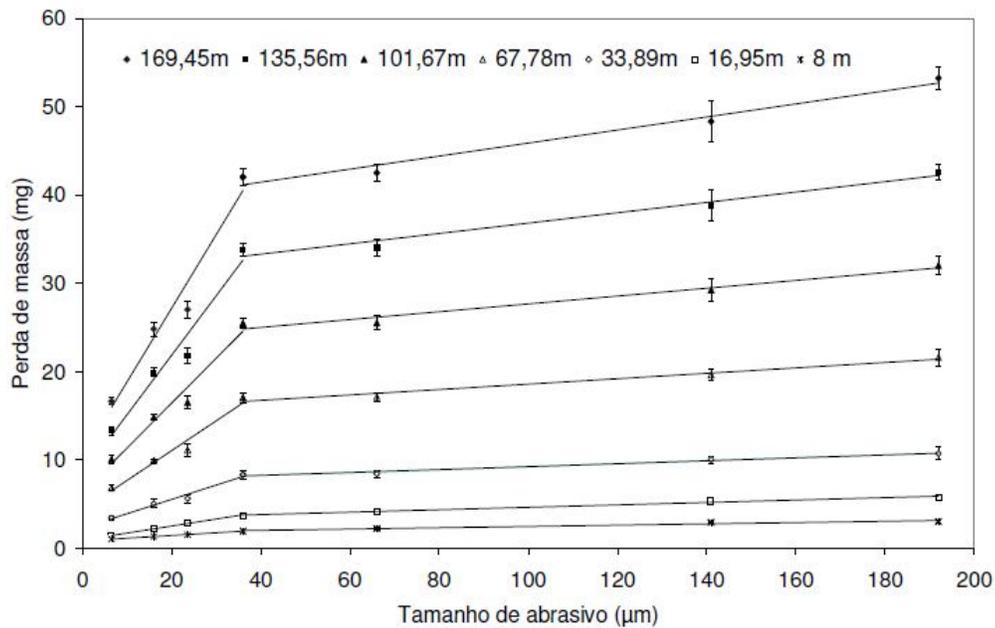


Figura 2-6 - Relação entre a perda de massa e o tamanho de abrasivo para o ferro fundido branco com matriz austenítica e diferentes distancias de deslizamento. Fonte: CORONADO e SINATORA, 2011a.

CORONADO e SINATORA (2011a) também exploraram o efeito combinado do tamanho da partícula abrasiva e da matriz do ferro fundido branco no desgaste. Na figura 2.7 esta a comparação entre a perda de massa do ferro fundido com matriz austenítica e martensítica num desgaste pino sobre lixa com lixa de alumina, carga normal de 4,6 N e distância percorrida de 33,89 m.

A variação no volume perdido quando o TCA é atingido pode ser atribuída à mudança no mecanismo de desgaste predominante, de microcorte para microsulcamento. Partículas abrasivas maiores resultam em sulcos mais profundos e largos e maior deformação plástica.

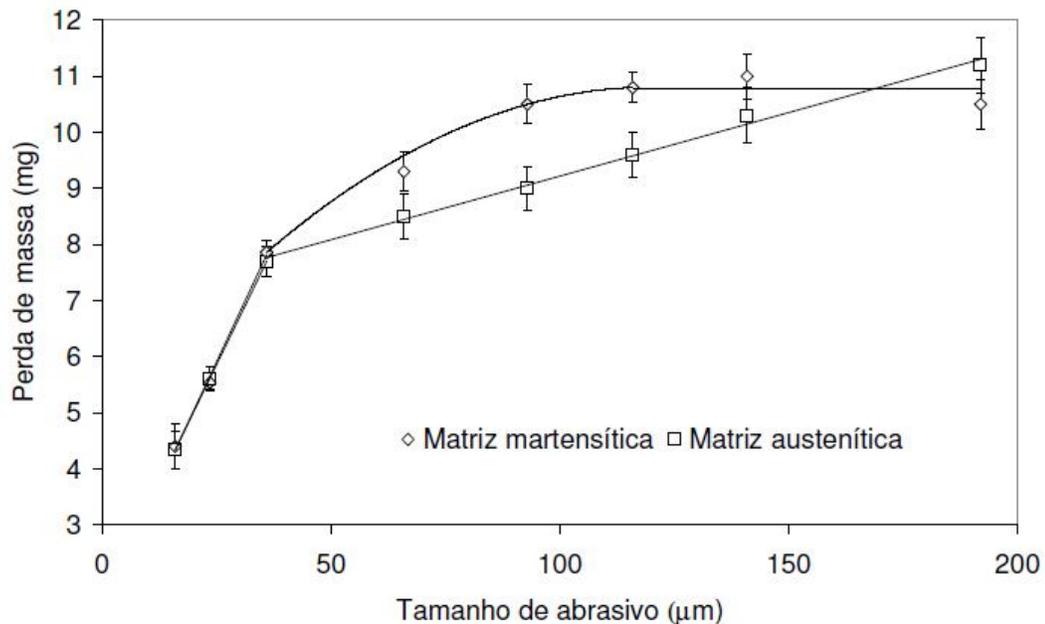


Figura 2-7 - Relação entre a perda de massa e o tamanho de abrasivo para o ferro fundido branco com matriz austenítica e martensítica. Fonte: CORONADO e SIANTORA, 2011a.

Nota-se no gráfico 2.7 que para o ferro fundido com matriz martensítica e austenítica a perda de massa aumenta linearmente até o tamanho crítico de 36 μm como os abrasivos menores são mais pontiagudos desgastam de maneira semelhante os dois materiais. Porém entre os valores de 66 μm e 116 μm os materiais têm comportamentos diferentes. Nessa região o desgaste do ferro fundido com matriz martensítica foi maior, o que pode ser explicado pela menor ductilidade da matriz que tem menor capacidade de deformar e formar *debris*, os abrasivos nessa faixa de tamanho conseguem cortar a matriz martensítica produzindo *debris* contínuos e, conseqüentemente, maiores perda de massa. Já para os abrasivos acima de 116 μm, a curva fica constante independente do aumento no tamanho de abrasivo, isso porque os abrasivos maiores possuem pontas arredondadas que não podem cortar o material com a mesma efetividade

que os abrasivos menores, produzindo assim uma perda de massa constante (CORONADO, 2010).

#### 2.4. *Mapa de desgaste*

Mapa de desgaste é uma representação gráfica bidimensional ou tridimensional elaborada com os resultados obtidos de uma série de ensaios de desgaste individuais realizados com o mesmo tipo de equipamento (JENSEN et al., 2010).

Essa representação é elaborada com o intuito de facilitar a visualização do comportamento dos materiais submetidos a diferentes condições de desgaste, essas informações obtidas a partir do mapa permitem a melhor seleção de materiais e de condições de operação, muito importante para projeto de equipamentos que trabalham com elevado desgaste, como os equipamentos de cominuição de minério, por exemplo, britadores e moinhos (LIM, 1998 e JENSEN et al., 2010).

Geralmente, um mapa de desgaste apresenta graficamente as taxas de desgaste na ordenada e as condições de trabalho do material de interesse na abscissa, esse gráfico pode ser elaborado de diversas maneiras, por exemplo, podem-se usar as micrografias das superfícies desgastadas para mostrar as características do contato e destacar os mecanismos de desgaste dominantes. Ou podem-se utilizar dados empíricos obtidos de experimentos combinados ou não com equações matemáticas usadas para prever as taxas de desgaste ou, ainda, podem-se aplicar métodos computacionais e a mecânica do contínuo (LIM, 1998; ASHBY e LIM, 1990; WILLIAMS, 1999; JENSEN et al., 2010) .

O importante é conseguir abranger a maior quantidade de condições de desgaste possíveis para obter um mapa mais completo do material.

A maioria dos mapas de desgaste encontrados na literatura retrata o desgaste por deslizamento. A seguir é apresentado um breve histórico sobre os principais trabalhos desenvolvidos a respeito desse tema.

O primeiro trabalho abordando mapa de desgaste por deslizamento data de 1941, desenvolvido por OKOSHI e SAKAI. Os autores usaram um mapa para representar as taxas de desgaste como uma superfície no espaço tridimensional, usando como variáveis a carga e a velocidade de deslizamento no plano e a taxa de desgaste no eixo perpendicular (OKOSHI e SAKAI, 1941).

Na década de 1980, diferentes mapas de desgaste por deslizamento foram propostos por diversos autores, dentre eles destacou-se o mapa proposto por Childs. O mapa resume o desenvolvimento de estudos desde os anos de 1950 e foi elaborado investigando a influência da velocidade de deslizamento e a carga no desgaste entre aços dúcteis sem lubrificação, observando a importância da formação do filme óxido para o desgaste (CHILDS, 1980).

ASHBY e LIM (1990) apresentam uma teoria sobre o desenvolvimento de mapas de desgaste combinando dados empíricos obtidos nos ensaios com equações físicas de desgaste. Desta forma, tem-se a possibilidade de fornecer num mapa muitas informações sobre o comportamento de determinada liga no desgaste, e apresentar uma visão geral do comportamento da liga sobre diversas condições de trabalho.

LIM (2002) desenvolveu mapas de desgaste por deslizamento enfatizando a importância da formação da camada de óxido para controlar as taxas de desgaste.

No trabalho de RIAHI e ALPAS (2003) foi construído um mapa de desgaste explorando os mecanismos de desgaste por deslizamento de um ferro fundido cinzento A30 sobre um aço AISI 52100. Utilizaram um equipamento de desgaste bloco sobre anel, variando carga e velocidade de deslizamento. As taxas de desgaste medidas e os principais mecanismos de desgaste foram usados para determinar a figura 2.8, com logaritmo da velocidade e da carga nos eixos.

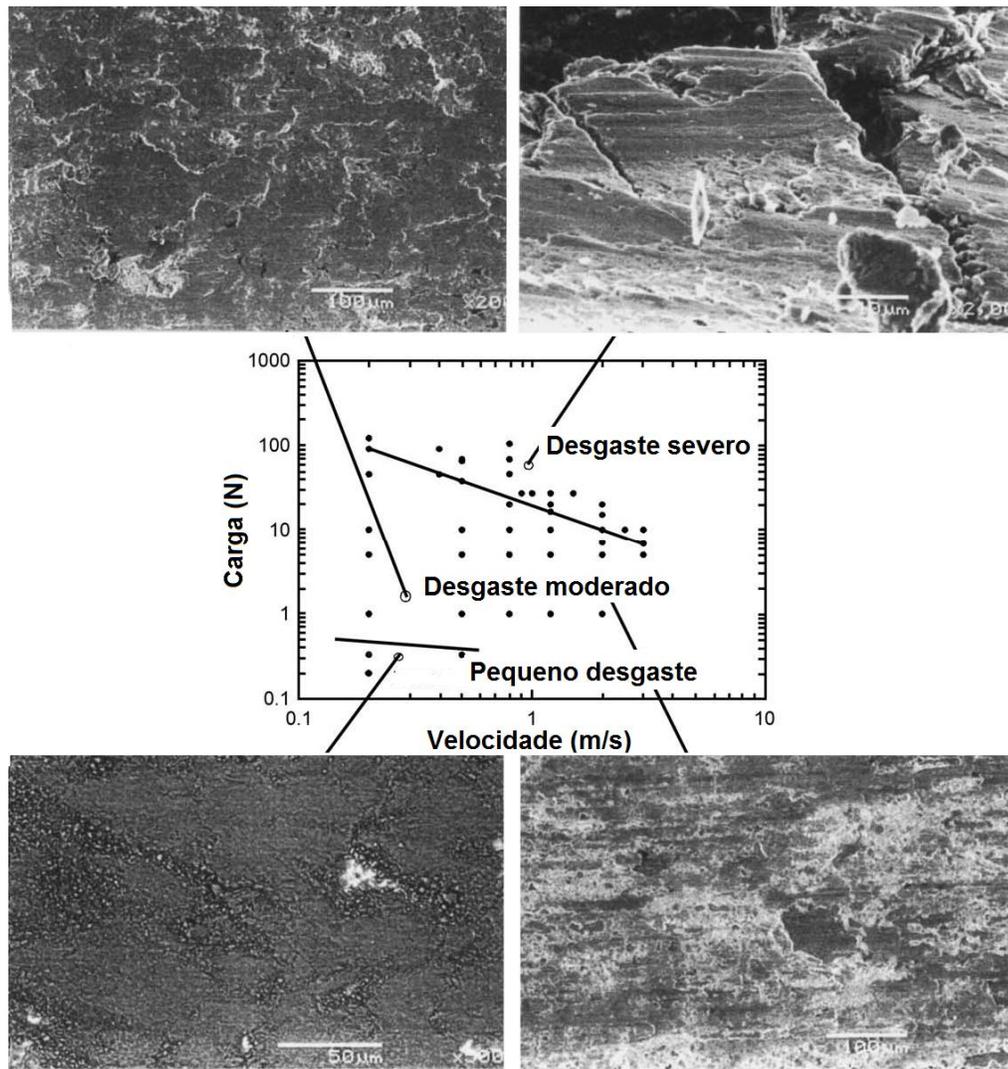


Figura 2-8 - Mapa de desgaste por deslizamento do ferro fundido cinzento A30 contra um aço AISI 52100 em função do logaritmo da carga e da velocidade de deslizamento. Destaque para as micrografias da superfície do ferro fundido mostrando os micromecanismos de desgaste para cada condição de ensaio. Fonte: Adaptado de RIAHI e ALPAS, 2003.

Como pode ser visto no que se refere ao desgaste por deslizamento, diversos autores já pontuaram como, por exemplo: OKOSHI e SAKAI, 1941; CHILDS, 1980; ASHBY e LIM, 1990; SLIFKA, 1993; LIM, 2002; RIAHI e ALPAS, 2003.

Os mapas de desgaste por abrasão para metais e ligas, no entanto, não foram muito explorados, dentre os trabalhos abordando o desgaste abrasivo destacam-se, por exemplo, o clássico trabalho de HOKKIRIGAWA e KATO de 1988 e trabalhos mais recentes como o do WILLIAMS de 1999 e o trabalho do JENSEN et al. de 2010.

O clássico trabalho de HOKKIRIGAWA e KATO (1988) sobre os mecanismos de desgaste atuantes na abrasão fez extenso uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para relacionar os mecanismos de desgaste atuantes com o grau de penetração ( $D_p$ ) do abrasivo. Esse parâmetro é definido pela razão entre a profundidade de penetração ( $h$ ) e o raio de contato ( $a$ ) para uma partícula esférica, como mostra a figura 2.9.

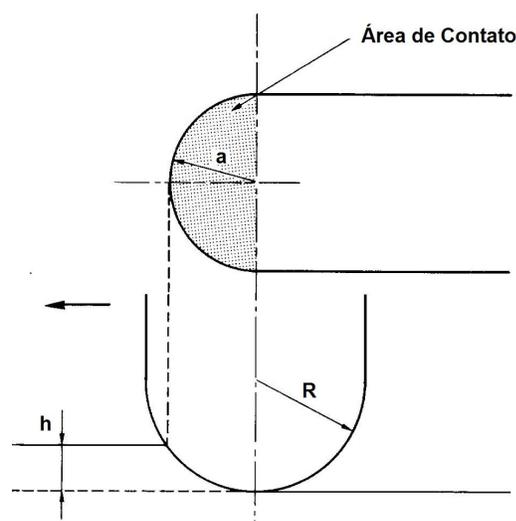


Figura 2-9 - Variáveis utilizadas para a definição do parâmetro  $D_p$  do abrasivo ( $D_p = h/a$ ). Fonte: adaptado de HOKKIRIGAWA e KATO, 1988.

O diagrama da figura 2.10 mostra um mapa de desgaste abrasivo obtido por HOKKIRIGAWA e KATO mostrando as regiões de predominância de cada mecanismo de desgaste em função do grau de penetração do abrasivo ( $D_p$ ) e do parâmetro  $f$  (razão entre a resistência ao cisalhamento na interface de desgaste e a resistência ao cisalhamento do material em desgaste) para três materiais distintos.

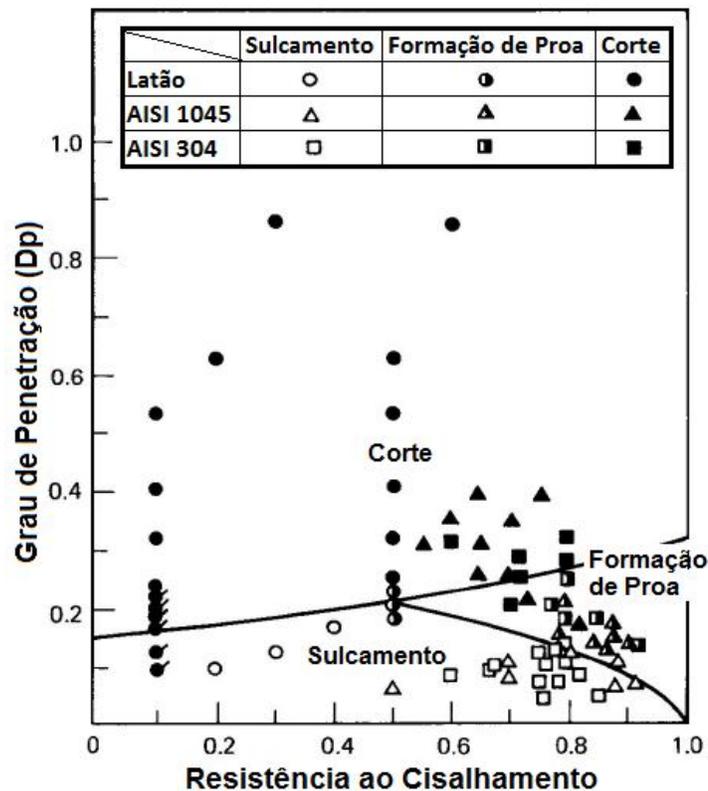


Figura 2-10 – Diagrama de mecanismo de desgaste abrasivo como função do grau de penetração ( $D_p$ ) e do parâmetro  $f$  relacionado com a resistência ao cisalhamento na interface de contato. Fonte: adaptado de HOKKIRIGAWA e KATO, 1988.

WILLIAMS (1999) fez um estudo sobre modelagem de desgaste envolvendo modelos analíticos, modelos computacionais, observações empíricas e mapas de mecanismo de desgaste.

Ele construiu o mapa da figura 2.11 com uma abordagem empregando mecânica do contínuo, determinando as regiões de influência de cada mecanismo

de desgaste para uma superfície macia deslizando sobre uma superfície com asperezas mais duras em função da relação entre as tensões de cisalhamento na interfase (onde  $k$  é a resistência ao cisalhamento da superfície mais macia) e o ângulo de ataque das asperezas da superfície mais dura ( $\theta$ ).

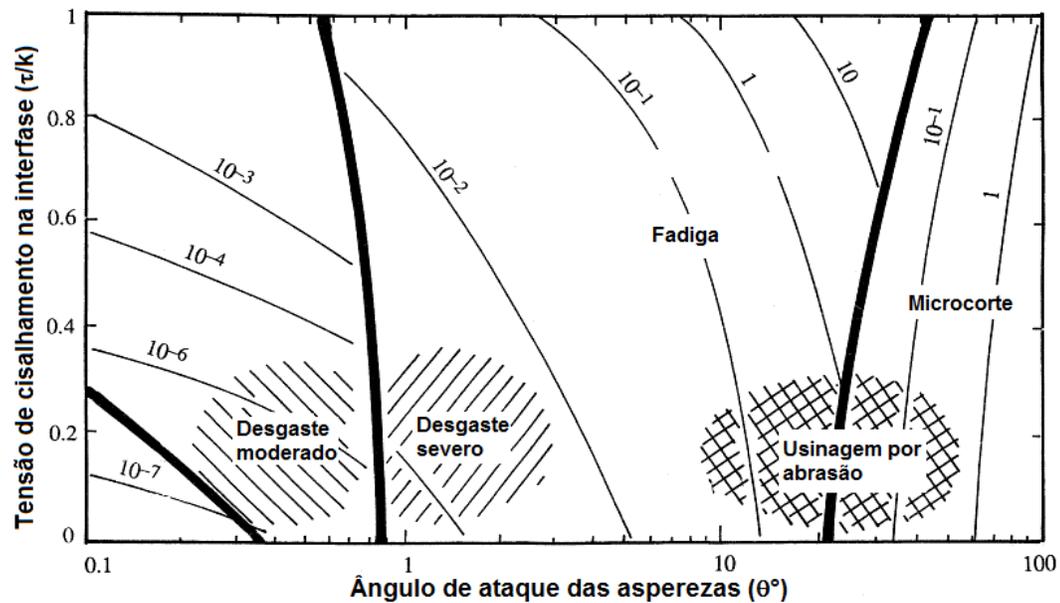


Figura 2-11 – Mapa de desgaste para uma superfície macia deslizando sobre uma superfície com asperezas mais duras. As linhas mais grossas definem os contornos dos mecanismos de desgaste e as linhas mais finas representam as taxas de desgaste. Fonte: adaptado de WILLIAMS, 1999.

JENSEN et al. (2010) desenvolveram mapas de desgaste explorando a variação das taxas de desgaste com a pressão aplicada e a velocidade para três diferentes materiais em desgaste abrasivo e comparam os diagramas obtidos.

Eles selecionaram um material de elevada resistência ao desgaste, o ferro fundido branco alto cromo, um aço resistente ao desgaste e tratado termicamente, o Hardox 400, e um aço estrutural simples, o S235, para a realização dos ensaios.

Jensen et al. perceberam um fenômeno interessante para a elaboração de mapas de desgaste: com pressão acima da faixa de 1000 kPa-1500 kPa a maior

parte das combinações de desgaste apresentou independência da carga e da velocidade, ou seja, o desgaste não aumenta com aplicação de pressões acima dessa faixa. Isso porque em elevadas pressões o abrasivo não fica preso entre as superfícies em desgaste, ele pode rolar e resultar em menores perdas de massa.

Na figura 2.12 estão os três mapas obtidos por Jensen et al. com os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo realizados num equipamento denominado MWT (*micro-wear tester*) que se assemelha a uma máquina modificada de polimento para amostras metalográficas.

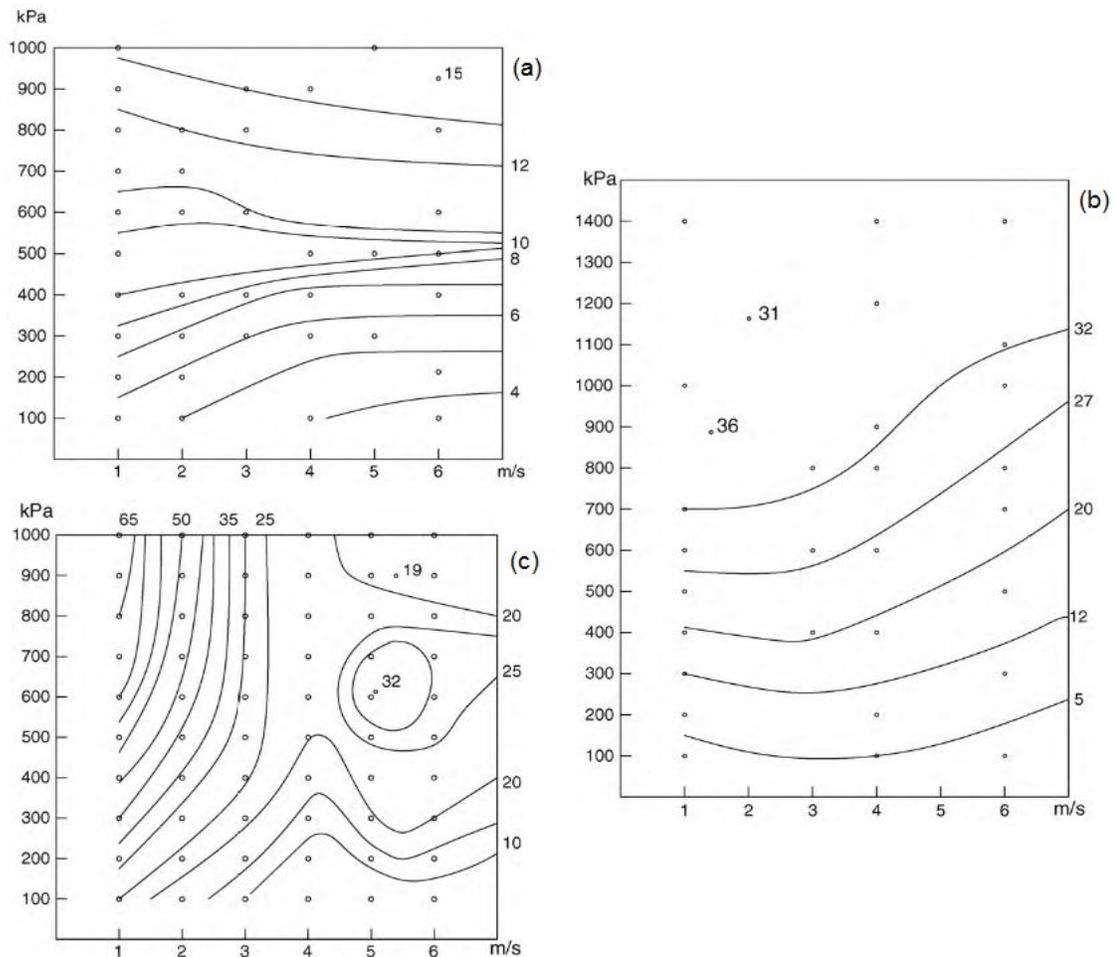


Figura 2-12 - Mapa de desgaste em função da carga e da velocidade para diferentes materiais, em (a) ferro fundido alto cromo; (b) HARDOX 400 e em (c) S235. Cada curva representa um índice de desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de JENSEN et al., 2010.

Fazendo uma análise dos três mapas de desgaste da figura 2.12, para o ferro fundido em (a) tem-se os menores níveis de desgaste, a taxa de desgaste é dependente da carga e independente da velocidade. Em (b) o Hardox 400 apresentou-se dependente da carga e da velocidade, com níveis elevados de desgaste para altas velocidades, até superando as taxas de desgaste do S235, apesar de ser conhecido como material resistente à abrasão. E, por fim, para o aço estrutural em (c) as taxas de desgaste são bem mais elevadas e apresentam um comportamento mais complexo sendo altamente dependente da carga e da velocidade, porém pode-se observar que para cargas acima de 1000 kPa e velocidade de 5 m/s o nível de desgaste diminui, o que torna o aço S235 uma possível opção para substituir o ferro fundido. Essas análises dos gráficos são úteis para tomada de decisão e escolha de materiais que trabalham em abrasão.

## 2.5. *Ferro fundido branco alto cromo (FFBAC)*

As ligas de FFBAC podem ser definidas como sendo ligas ferrosas contendo de 11 % a 30 % em peso de cromo e 1,8 % a 3,6 % em peso de carbono. Essas ligas possuem uma microestrutura heterogênea composta por carbonetos primários duros e/ou eutéticos do tipo  $M_7C_3$  (onde o M é uma combinação de elementos formadores de carboneto, como o cromo e ferro), dispostos em uma matriz mais macia (austenita, martensita, ferrita, perlita ou bainita) (TABRETT, SARE e GHOMASHCHI, 1996; DOGAN, LAIRD II e HAWK, 1997; MARATRAY e USSEGLIO-NANOT, 1970).

A estrutura heterogênea confere à liga de ferro fundido branco (FFB) excelente resistência ao desgaste, o que torna atrativo o uso dessas ligas na confecção de componentes industriais para os processos produtivos siderúrgicos, metalúrgicos e

indústria de cimento (pás de escavadeiras e equipamentos para a moagem de minérios), onde há elevada perda devido ao desgaste (TABRETT, SARE e GHOMASHCHI, 1996; DOGAN, LAIRD II e HAWK, 1997). Apesar dos recentes materiais que estão sendo desenvolvidos em substituição aos FFB, como os compósitos de matriz metálica (CMM) estudados por BERNS (2003), estes ainda são empregados devido ao custo elevado dos CMM.

Quanto à influência da microestrutura da matriz dos FFB no desgaste, ZUM GAHR (1980) comparou o desempenho da matriz martensítica e austenítica dos FFB para os ensaios com abrasivo de dureza menor que os carbonetos, e como resultado obteve um melhor desempenho da matriz martensítica, independente do volume de carbonetos. Um aumento de até 30% no volume de carbonetos favoreceu a redução nas taxas de desgaste. Além disso, uma redução no volume de austenita retida reduziu, também, as taxas de desgaste.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do mapa de desgaste abrasivo foram realizados ensaios de desgaste com dois níveis distintos de severidade, separados em duas séries de experimentos. A primeira série foi realizada no equipamento roda-de-borracha do TRICORRMAT/UFES, variando os parâmetros: intensidade da carga aplicada à amostra e tamanho da partícula abrasiva. A segunda série de ensaios foi realizada no equipamento pino sobre lixa do LTM/UFU, variando os parâmetros: material da lixa, tamanho do abrasivo e carga normal. As duas séries de experimentos foram realizadas em amostras de FFBAC com a mesma microestrutura e elevada resistência ao desgaste abrasivo.

#### 3.1. *Material: FFBAC*

Para a execução desse estudo foi selecionada uma liga de FFBAC.

A fundição e o tratamento térmico da liga de FFBAC foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT/SP).

A fundição da liga foi feita em um forno de indução INDUCTO 50, os blocos foram obtidos em um único vazamento do metal líquido em um molde como mostrado na figura 3.1 (a) feito de areia aglomerada com resina com sistema de canais e massalotes para propiciar a obtenção de peças isentas de defeitos como rechupes e porosidades. A peça bruta originada da fundição esta na figura 3.1 (b).

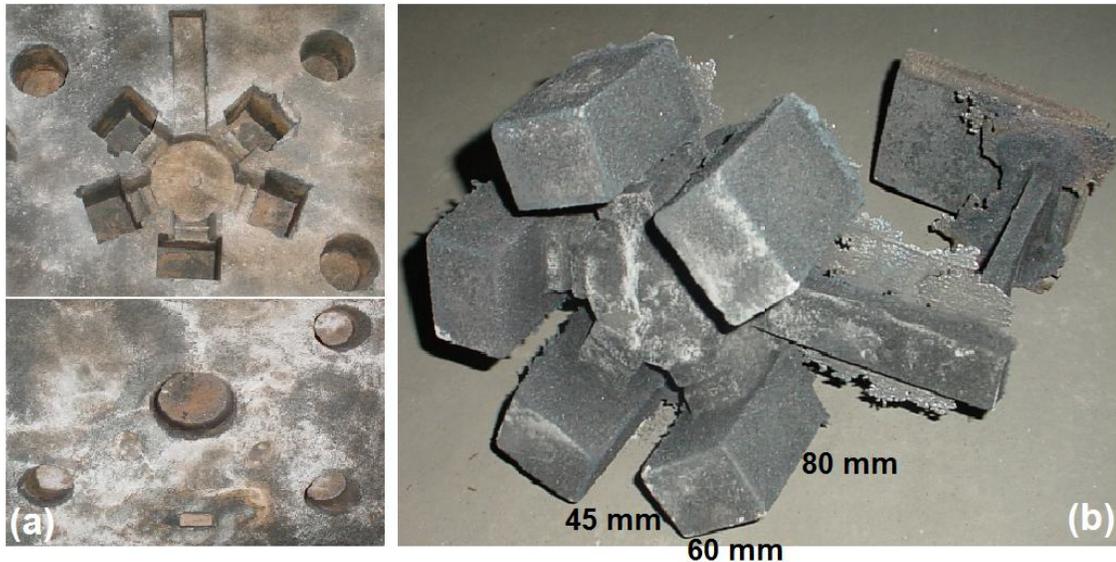


Figura 3-1 - (a) Molde utilizado para a fundição dos blocos de FFBAC. (b) Foto da peça bruta de fundição com os canais e massalotes.

### **3.1.1. Tratamento térmico da liga de FFBAC**

O tratamento térmico aplicado à microestrutura bruta de fundição foi realizado com o intuito de obter uma estrutura isenta de perlita e regiões de austenita retida identificáveis na microscopia óptica. Para tanto foi aplicado o tratamento térmico de desestabilização da austenita seguido de têmpera e revenido.

Os blocos foram aquecidos até 700 °C e mantidos por 2 horas para obter a desestabilização da austenita por meio da transformação em uma mistura de ferrita e carboneto. Depois a liga foi aquecida até a temperatura de 975 °C para austenitização das amostras com o intuito de formar austenita com concentração de carbono controlada. E, em seguida, o material foi temperado ao ar forçado para obtenção de uma estrutura de matriz martensítica de elevada dureza isenta de perlita ou austenita retida.

Um termopar foi colocado no local de resfriamento mais lento (no centro da amostra) e traçado uma curva de resfriamento apresentada na figura 3.2. Como a curva ficou a esquerda da curva de transformação da perlita, a têmpera em ar forçado aplicada garante a matriz martensítica e não formação de perlita na têmpera.

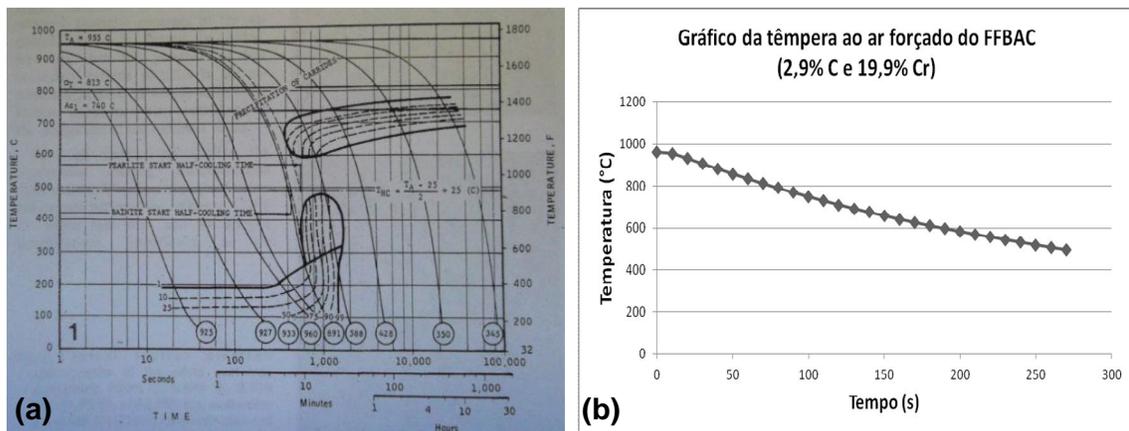


Figura 3-2 – Curvas de resfriamento da têmpera. Em (a) Curva do ferro fundido branco contendo 2,93% C e 17,4 % Cr. Fonte: MARATRAY e USSEGLIO-NANOT (1970). Em (b) Curva de têmpera ao ar forçado aplicado à liga de ferro fundido branco alto cromo contendo 2,9% C e 19,9% Cr.

Após a têmpera foi aplicado o revenido a 200 °C por 2 horas para reduzir a fragilidade da matriz sem causar modificação na estrutura.

### 3.1.2. Composição química e análise microestrutural da liga de FFBAC

A liga utilizada nesse trabalho possui composição química formada por 19,9% de cromo e 2,9% de carbono. A tabela 3.1 apresenta as porcentagens em massa de cada componente da liga.

Tabela 3-1 - Composição química analisada da liga de ferro fundido branco alto cromo. Porcentagem em peso dos principais componentes da liga e dos componentes residuais.

Principais Componentes (%)				Componentes Residuais (%)			
C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	P	S
2,9	19,9	1,2	0,58	0,15	0,02	0,024	0,008

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT-SP, 2011.

Fazendo uso da equação para o cálculo da porcentagem de carbonetos, encontrada em MARATRAY e USSEGLIO-NANOT (1970), a fração de carbonetos para essa liga foi estimada em, aproximadamente, 30%.

O resultado da análise metalográfica após ataque químico com reagente Kalling's, na figura 3.3, revela a microestrutura de FFBC de matriz martensítica revenida e um eutético contendo: carbonetos do tipo  $M_7C_3$  e martensita revenida, ausente de áreas de perlita ou de austenita retidas visíveis na microscopia ótica.

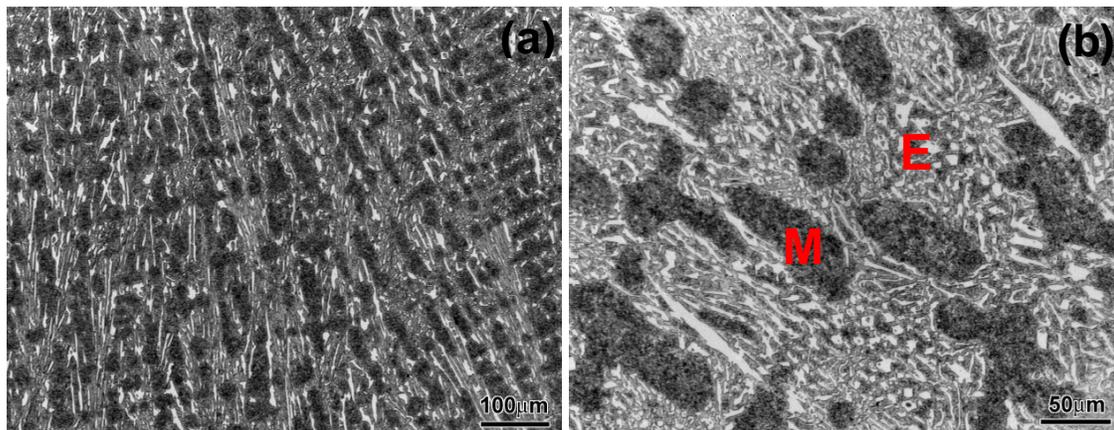


Figura 3-3 - Microestrutura do FFBC com matriz martensítica e carbonetos. A parte mais clara é o eutético contendo carbonetos na matriz de martensita revenida (em E) e a região mais escura é martensita revenida (em M). Micrografia do ótico em (a) aumento de 100 vezes e em (b) 200 vezes.

A composição química da austenita antes do resfriamento, anterior a formação da martensita, está na tabela 3.2.

Tabela 3-2 - Composição química da austenita antes do resfriamento, estimativa feita utilizando o software Thermo-Calc.

<b>Composição Química da Austenita:</b>				
Temperatura da Têmpera	%Cr	%C	%Mn	%Si
975°C	5,8	0,49	1,2	0,8

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT/SP, 2011.

### **3.1.3. Medidas de dureza**

Foram realizados ensaios de dureza Rockwell C no durômetro Wolpert do TRICORRMAT/UFES. Foi aplicada como pré-carga: 10 kgf e carga total: 150 kgf.

Os ensaios de dureza e microdureza Vickers foram realizados no durômetro Shimadzu do LTM/UFU. Nos ensaios de dureza foi aplicada uma carga de 40 kgf. Nos ensaios de microdureza foi aplicada a carga de 0,1 kgf na matriz, e carga de 1 kgf aplicada na matriz e nos carbonetos. Para revelar a matriz e os carbonetos foi realizado ataque com reagente Villela.

Em todos os ensaios foram realizadas no mínimo 10 repetições.

### **3.1.4. Durezas dos componentes do FFBAC e dos abrasivos**

Na tabela 3.3 estão os valores de dureza dos componentes do FFBAC, dos abrasivos que foram utilizados nos ensaios e do carbeto de silício (SiC), adaptado de HUTCHINGS (1992).

Tabela 3-3 – Valores de dureza Vickers dos abrasivos utilizados nos ensaios, da matriz martensítica, dos carbonetos ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) e do carbeto de silício (SiC).

<b>Tabela de Durezas</b>	
Material:	Dureza (HV):
Areia ANB*	1260-1440
Sílica ( $\text{SiO}_2$ )	750-1200
Granada	600-1000
Carbeto de Silício (SiC)	2100-2600
Carboneto ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ )	1600
Martensita	500-1000

Fonte: adaptado de HUTCHINGS, 1992. \*Exceto a dureza da areia ANB encontrada em VILLABON, 2005.

Nos itens a seguir são descritas as duas séries de ensaios de desgaste: a primeira série realizada no equipamento roda-de-borracha, e a segunda série de ensaios (mais severa) realizada no pino sobre lixa.

### 3.2. *Ensaio: roda-de-borracha*

Os ensaios foram conduzidos em abrasômetro roda-de-borracha horizontal modificado em relação à norma ASTM G-65 por HUTCHINGS e STEVERSON (1996). O equipamento é mostrado na figura 3.4.



Figura 3-4 – Fotografia do equipamento de ensaio de desgaste abrasivo roda-de-borracha do TRICORRMAT/UFES, em funcionamento.

Os itens enumerados na figura 3.4 correspondem a:

1. Silo de armazenamento do abrasivo que será utilizado no ensaio;
2. Motor de indução e tambor ranhurado que controlam a quantidade de abrasivo que cai na calha em 3;
3. Calha que guia o fluxo de abrasivo do tambor até a interfase entre a borracha e a amostra;
4. Suporte onde são encaixadas as anilhas com massas diferentes. A combinação dessas anilhas determina a carga normal aplicada sobre a amostra;

5. Braço de alavanca que faz o contato entre a superfície da roda e a da amostra;
6. Porta-amostra, local onde a amostra de ferro fundido é afixada;
7. Roda de aço revestida com borda de borracha que acomoda o abrasivo. A fixação da borracha na roda é feita pelo processo de vulcanização. O diâmetro total da roda de 215,9 mm a 228,6 mm e a dureza do revestimento de borracha de  $60 \pm 2$  Shore A são determinados pela Norma ASTM G-65;
8. Recipiente utilizado para armazenar o abrasivo que entra em contato com a amostra. A massa da areia armazenada nesse recipiente é medida após cada ensaio, com essa medida é calculada a vazão de abrasivo que desgasta a amostra;
9. Recipiente usado para recolher o abrasivo que não entra em contato com a amostra;
10. Inversor de frequência que é utilizado para controlar a velocidade de rotação da roda. O inversor está conectado em um motor de 0,7 kW de potência, e o motor está conectado a uma caixa de redução com relação de transmissão de 10/1 que garante que todo o torque do motor é passado para o eixo da roda durante os ensaios mantendo a velocidade de rotação constante mesmo após a aplicação da carga normal aos corpos-de-prova;

No ensaio a amostra plana é colocada na horizontal tangenciando a roda revestida de borracha, o fluxo de areia escoar no espaço entre a superfície da roda e o corpo-de-prova, sobre o corpo-de-prova é aplicada a carga normal com o uso de um peso morto sobre o braço de alavanca. Assim é possível medir a quantidade exata de abrasivo que passa pela amostra.

Para a quantificação do desgaste é medida a massa da amostra, antes e depois de cada ensaio em uma balança analítica (detalhes no anexo B e na seção 3.2.1).

Na tabela 3.4 estão os parâmetros da Norma ASTM G-65 utilizados para a realização dessa primeira série de ensaios. Os parâmetros foram escolhidos de acordo com o procedimento A da norma para materiais de moderada a elevada resistência ao desgaste (descrito no Anexo A).

Foi utilizada velocidade de rotação do disco de 200 rpm e tempo de ensaio de 30 min. A vazão do abrasivo na interfase do contato foi mantida constante em, aproximadamente, 120 g/min.

Tabela 3-4 – Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios no equipamento roda-de-borracha, seguindo o procedimento A da Norma ASTM G-65.

<b>Parâmetros de ensaio adotados - Norma ASTM G-65</b>			
Procedimento:	Carga aplicada ao corpo-de-prova:	Rotações do disco:	Distância Percorrida:
A	130 N	6000 rpm	4309 m

Fonte: Adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Os ensaios foram realizados variando o tamanho da partícula abrasiva (os diferentes tamanhos de grão foram obtidas através de peneiramento como será descrito no item 3.2.2) e, também, a carga normal aplicada sobre o corpo-de-prova de FFBC utilizando força normal de 44 N, 80 N e 130N.

Foram realizados três repetições para cada condição de ensaio como recomendado pela Norma ASTM G-65.

### 3.2.1. Usinagem da amostra: roda-de-borracha

Cinco blocos de FFBC, tratados termicamente, com as dimensões de 45 mm x 60 mm x 85 mm foram fornecidos pelo IPT/SP.

Para a realização dos ensaios de desgaste abrasivo foi necessária a confecção de 27 amostras de FFBC nas dimensões 9 mm x 25 mm x 76 mm como mostrado na figura 3.5, dimensões determinadas pela norma ASTM G-65 (anexo A), para o encaixe correto do corpo-de-prova no porta-amostra do equipamento.

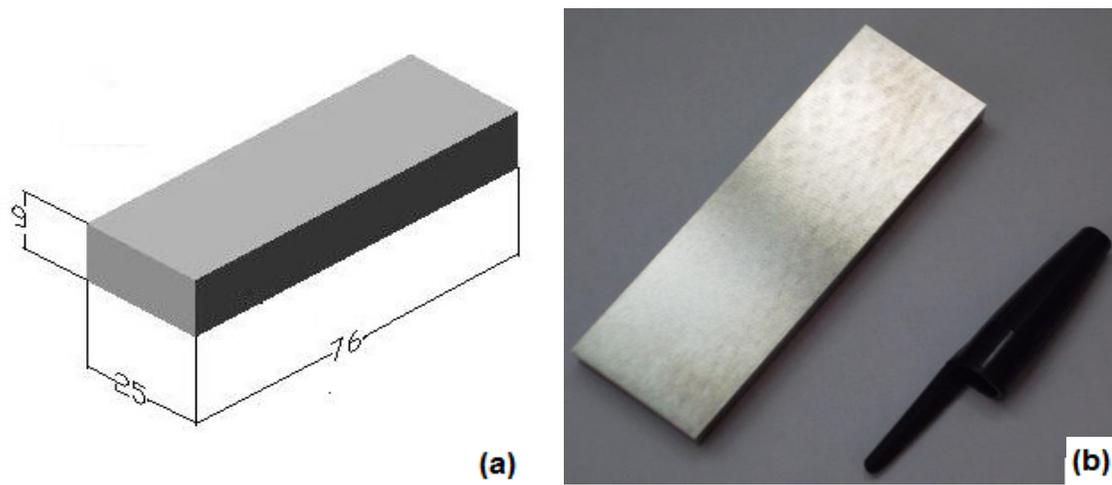


Figura 3-5 – (a) Desenho ilustrativo da geometria dos corpos-de-prova para ensaios no roda-de-borracha, com medidas em milímetros. (b) Fotografia da amostra, após retífica nas dimensões 9 mm x 25 mm x 76 mm.

Devido às propriedades de alta dureza da liga é difícil usiná-la utilizando os métodos convencionais, sendo necessária a usinagem por eletroerosão a fio.

A usinagem das amostras por eletroerosão a fio foi conduzida em uma máquina da Agie Charmille, modelo CUT 20, com fio de latão com diâmetro de 0,15 mm e lubrificação a água, pertencente à Reval Metal Mecânica Ltda (Serra/ES). A

figura 3.6 mostra uma fotografia do equipamento no qual foi realizado o processo de usinagem dos blocos.



Figura 3-6 – Fotografia da máquina de corte por eletroerosão a fio utilizada para a usinagem das amostras para o ensaio roda-de-borracha da Reval Metal Mecânica Ltda (Serra/ES).

Após o corte por eletroerosão, para garantir paralelismo e baixa rugosidade nas superfícies, utilizou-se uma retífica plana tangencial Magnum-cut, modelo RP6330A, do LABTECMEC/UFES. Foi aplicado um passe de 0,02 mm, utilizada lubrificação com óleo mineral solúvel, e rebolo da marca Norton com abrasivo de óxido de alumínio branco com granulometria de 120# para o acabamento da superfície da amostra.

### **3.2.2. Areia normal brasileira**

Os diferentes tamanhos de grão abrasivo foram obtidos com o peneiramento do descarte fino da areia normal brasileira do IPT/SP.

O peneiramento da areia foi realizado conforme Norma SAE J444 (2005). Foi usado um peneirador e quatro peneiras com as seguintes aberturas na malha:

150 µm, 106 µm, 75 µm e 44 µm, colocadas nessa ordem, de cima para baixo, sobre o peneirador. Foi adotado um intervalo de tempo de 15 minutos para peneirar cada 1,5 Kg de areia. Do peneiramento resultaram três intervalos de tamanho de grão abrasivo.

A classificação das granulometrias obtidas foi realizada com o uso do granulômetro a laser da Sympatec, modelo Helos/BF. O peneirador, as peneiras e o granulômetro utilizados pertencem ao LEMAC/UFES.

O fator de esfericidade ( $f_e$ ) da areia foi calculado utilizando equação 3.1, encontrada em HUTCHINGS (1992):

$$f_e = \frac{\text{Área planificada}}{\text{Área do círculo de mesmo perímetro}} \quad 3.1$$

O valor da área planificada, do perímetro e do diâmetro da partícula, necessários para o cálculo do fator, foram obtidos no MEV do LCSM/UFES.

### **3.2.3. Carga normal: roda-de-borracha**

O efeito da aplicação da carga normal no desgaste abrasivo do FFAC, também, foi um dos parâmetros em estudo. Para tanto foram selecionadas três cargas (130 N, 80 N e 44 N).

Essas cargas foram obtidas por combinação das anilhas colocadas no suporte do braço de alavanca aplicando força normal sobre a amostra como um peso morto. As massas das anilhas disponíveis para a realização dos ensaios são mostradas na tabela 8.1 do anexo A.

### **3.2.4. Revestimento de borracha**

O revestimento de borracha da roda foi fixado pelo processo de vulcanização na empresa Vedaflex Vedações Industriais Ltda (Serra/ES). Foi mantido o diâmetro total do disco entre 215,9 mm e 228,6 mm e a dureza de 60 Shore A, conforme recomendado pela Norma ASTM G-65.

O detalhe da borracha revestindo a roda é mostrado na figura 3.7.

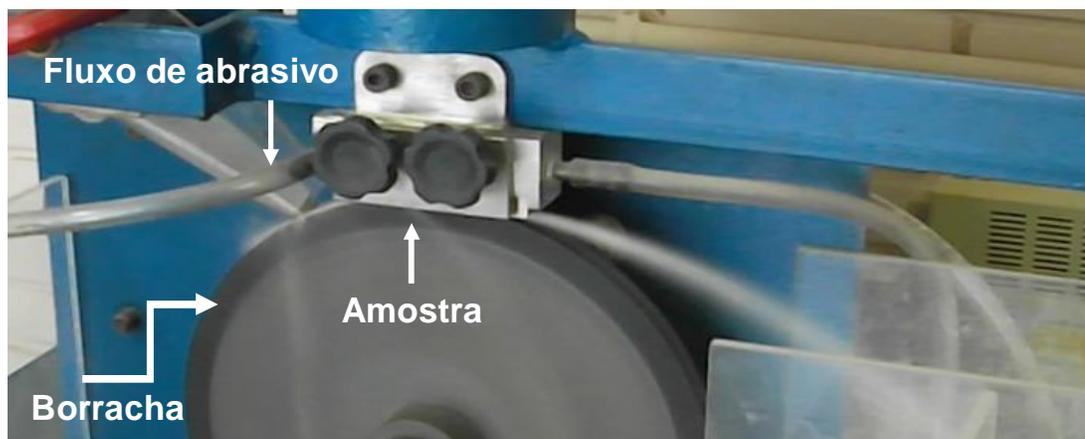


Figura 3-7 - Fotografia da roda-de-borracha, em funcionamento, detalhe da passagem do abrasivo na interface do contato entre a amostra e o revestimento de borracha.

### **3.2.5. Procedimento para limpeza dos corpos-de-prova**

Antes e depois de cada ensaio foi necessário fazer a limpeza dos corpos-de-prova para a medida correta da massa perdida no desgaste.

A limpeza das amostras foi realizada com o uso do ultrassom. Para a remoção de pó e sujeira, a amostra foi primeiramente imersa num Becker contendo álcool etílico colocado no ultrassom por 10 minutos, depois foi colocada no Becker com acetona por mais 10 minutos no ultrassom. Para secar a amostra foi utilizado um secador com ar quente por 10 minutos e em seguida ar frio por mais 10 minutos para resfriá-la.

Depois de limpa e seca, pesou-se a amostra numa balança eletrônica Sartorius, modelo CP225D com resolução de  $10^{-4}$  g, antes e depois de cada ensaio. Para determinação da massa foi calculada a média aritmética de sete medições.

Com a medida da massa perdida e a densidade do material em desgaste (ver tabela no anexo C) é calculado o volume perdido com a equação 3.2.

$$\text{Volume Perdido}(\text{mm}^3) = \frac{\text{Massa Perdida}(\text{Kg})}{\text{Densidade}(\text{Kg}/\text{mm}^3)} \quad 3.2$$

### 3.3. Ensaio: pino sobre lixa

Para a realização dos ensaios de desgaste pino sobre lixa foi utilizado o abrasômetro mostrado na figura 3.8, desenvolvido no LTM/UFU.

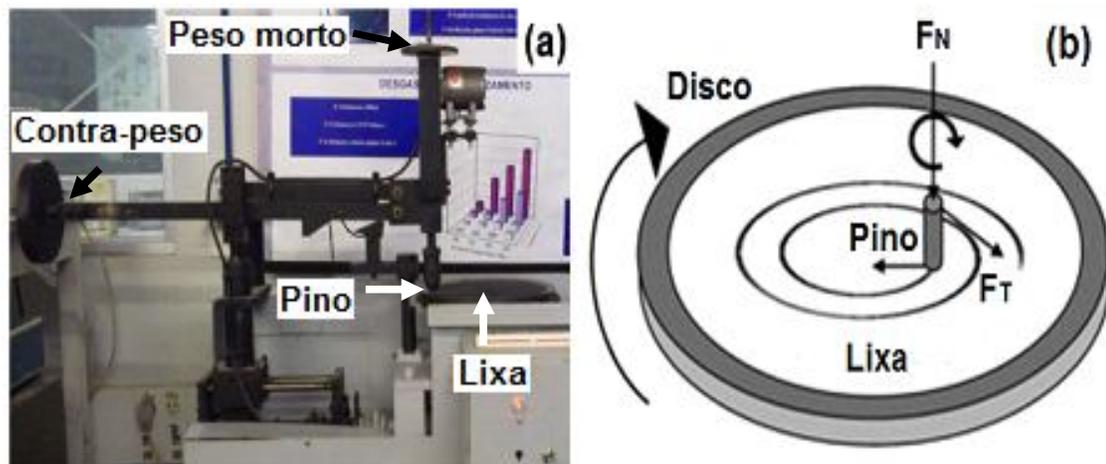


Figura 3-8 - Abrasômetro pino sobre lixa. (a) Fotografia do abrasômetro pertencente ao LTM/UFU.

(b) Desenho esquemático do ensaio de desgaste pino sobre lixa.

O ensaio consiste na passagem de um pino sobre uma lixa circular em uma trajetória descrevendo um espiral de Arquimedes, esse movimento garante a

presença de abrasivo novo em todo o processo de desgaste. Nessa trajetória, a amostra percorre uma distância média de 6,2 m sobre o disco com um diâmetro inicial de 220 mm e final de 27 mm, os ensaios foram realizados com valores fixos de velocidades de rotação do pino de 25 rpm e de rotação do disco de 35 rpm.

O abrasômetro usado nesse trabalho, figura 3.8, possui um braço de alavanca sobre o pino onde é colocada a carga de massa conhecida que atua como uma força normal à superfície em desgaste. Além disso, acoplado ao abrasômetro tem-se uma célula de carga que mede o valor da força tangencial aplicada à amostra, esse valor é enviado para um microcomputador IBM PC que possui um software específico que permite quantificar essa força tangencial, e também, o valor do coeficiente de atrito e do desvio padrão dessas medidas.

A resistência ao desgaste é mensurada com o conhecimento da massa perdida das amostras após cada ensaio. A massa perdida, por sua vez, é calculada pela diferença entre os valores da massa medidos antes e depois de cada ensaio em uma balança analítica da marca OHAUS de resolução de  $10^{-4}$  g. Após obtenção da diferença de massa é calculado o volume perdido utilizando a equação 3.2.

Para garantir que apenas a massa de material perdido no desgaste é medida na balança, a limpeza dos corpos-de-prova foi realizada conforme descrito na seção 3.2.5.

A tabela 3.5 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios de abrasão pino sobre lixa.

Tabela 3-5 – Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste abrasivo pino sobre lixa.

<b>Parâmetros usados no ensaio de desgaste pino sobre lixa:</b>	
Rotação do Disco (rpm)	35
Rotação da Amostra (rpm)	25
Formato da Amostra	Cilíndrica
Diâmetro da Amostra (mm)	6
Altura da Amostra (mm)	20
Tipo de Abrasivo	Sílica e Granada
Granulometria do Grão Abrasivo (#)	220, 100 e 80
Carga Normal (N)	5 e 10

Para cada condição de ensaio foram realizadas 3 repetições.

Antes da realização dos ensaios, as amostras de FFBC foram confeccionadas no formato de pinos com 6 mm de diâmetro e 20 mm de altura para o encaixe correto das amostras no equipamento (seção 3.3.1).

### **3.3.1. Confeção da amostra: pino sobre lixa**

As amostras do ensaio pino sobre lixa foram obtidas pelo processo de eletroerosão por penetração, porém antes do corte dos pinos foi necessário retirar as rebarbas da fundição dos blocos de FFBC. Para isso foi feito um corte com eletroerosão a fio 5 mm abaixo de cada superfície do bloco. Após a retirada da rebarba, as superfícies dos blocos foram retificadas no LABTECMEC/UFES, com as mesmas condições utilizadas na retificação das amostras do ensaio roda-de-borracha descritas na seção 3.2.1, com o intuito de obter uma superfície lisa em uma das extremidades do pino.

Na figura 3.9 é mostrada a máquina de eletroerosão por penetração da IBH Tecnologia pertencente à Usicorte Usinagem de Metais LTDA (Serra/ES) utilizada para usinagem dos pinos.

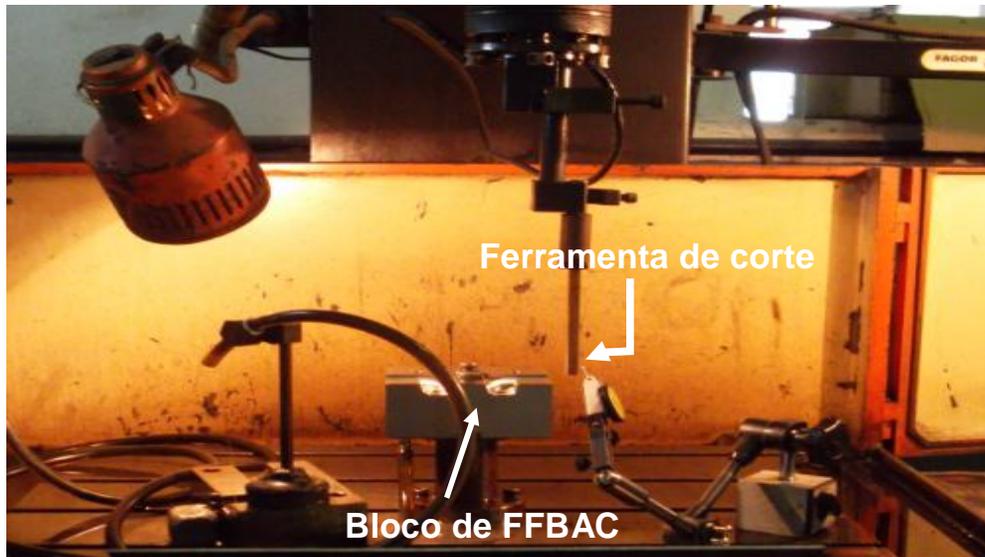


Figura 3-9 – Máquina de usinagem por eletroerosão por penetração utilizada para a usinagem dos pinos do ensaio pino sobre lixa, da Usicorte Usinagem de Metais Ltda (Serra/ES).

Para a confecção dos pinos foi utilizada uma ferramenta de cobre eletrolítico vazada. A figura 3.10 mostra o eletrodo de cobre e o pino de ferro fundido retirado do bloco com dimensões: 6 mm x 30 mm. Foi aplicada de uma tensão de 40 V e corrente elétrica de 5 A. O corte de cada pino teve duração de 3 horas.

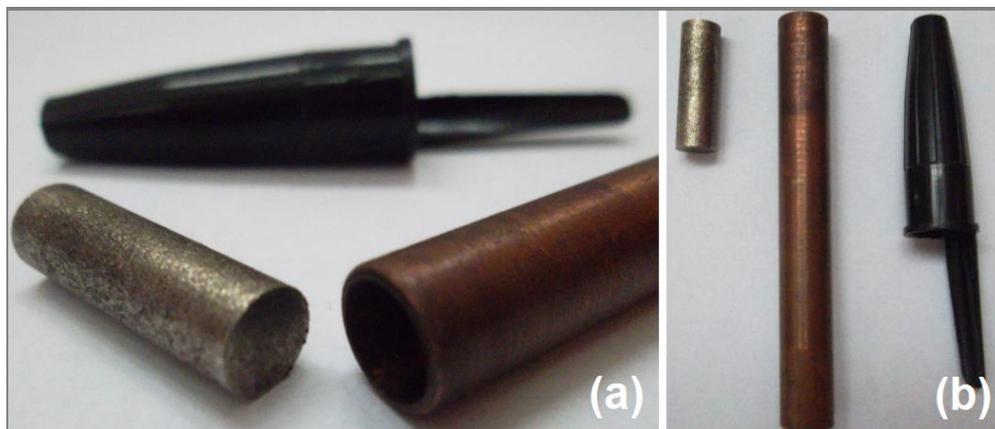


Figura 3-10 – (a) Fotografia do pino de ferro fundido branco à esquerda e da ferramenta de cobre à direita mostrando a abertura da ferramenta para o corte do pino. (b) Pino à esquerda e ferramenta de cobre à direita.

Para garantir o diâmetro do pino constante em todas as seções da altura do pino, a profundidade da penetração do cobre foi aumentada para 30 mm sem a remoção completa do mesmo do bloco. A altura de 20 mm dos pinos foi obtida com corte por eletroerosão a fio.

### **3.3.2. Lixas**

Um dos parâmetros de desgaste estudado foi o tamanho do abrasivo, portanto foram selecionadas lixas com tamanhos de abrasivos diferentes, foram utilizadas lixas de sílica de 220# (63  $\mu\text{m}$ ) e 80# (177  $\mu\text{m}$ ), e lixas de granada de 220# e 100# (149  $\mu\text{m}$ ).

As lixas escolhidas de granada e sílica possuem menor dureza quando comparada com as lixas tradicionais de carbeto de silício (SiC), o que pode ser visto na tabela 3.3. Elas foram escolhidas para serem sensíveis aos componentes da microestrutura, além da sílica ser um abrasivo natural comumente encontrado na indústria.

### **3.3.3. Carga normal: pino sobre lixa**

A carga também foi uma das variáveis escolhida para a elaboração do mapa de desgaste, para a carga normal foram selecionados os valores de 5 N e 10 N. Escolhidos de acordo com trabalhos de CORONADO e SINATORA (2009a) e CORONADO (2010).

### *3.4. Análise topográfica das superfícies*

Um Analisador Tridimensional de Superfície da marca Taylor Hobson, modelo Talysurf CLI 1000 pertencente ao LCSM/UFES foi utilizado para mensurar a topografia da superfície das amostras usando um perfilômetro de contato.

Foi escolhida uma área de 3 x 3 mm, no centro da marca de desgaste, para realizar a análise topográfica da superfície das amostras do ensaio no roda-de-borracha. Para os pinos do ensaio pino sobre lixa foi utilizada uma área de 2 x 2 mm, também, no centro da marca. Desta área foi obtido o parâmetro de rugosidade da superfície ( $S_q$ ), escolhido para comparação com os resultados de perda de massa.

As superfícies de desgaste das amostras do ensaio roda-de-borracha foram dispostas transversalmente com relação à ponta do apalpador.

### *3.5. Caracterização dos micromecanismos de desgaste*

A caracterização dos micromecanismos de desgaste das amostras foi realizada com a análise das micrografias obtidas do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca ZEISS modelo EVO 40 pertencente ao LCSM/UFES.

No próximo capítulo, estão os resultados obtidos após a execução das duas séries de ensaios com as interpretações e discussões dos mesmos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Resultados dos ensaios de dureza do FFBC

Os valores de durezas e microdurezas medidas das amostras são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4-1 – Durezas e microdurezas medidas nas amostras nas escalas Vickers e Rockwell C.

Durezas		Microdurezas	
Vickers (40 Kg)	Rockwell C (150 Kg)	Vickers (1,0 Kg)	Vickers (0,1 Kg)
772,0 ± 0,0*	62,8 ± 0,5	803 ± 9	770 ± 90

\*Todas as 10 repetições da medida resultaram no mesmo valor de 772 HV.

O valor obtido na dureza Rockwell C corrobora com o resultado de ALBERTIN e SINATORA (2001) e as durezas Vickers são próximas aos valores encontrados em ZUM GAHR (1987).

O elevado desvio padrão encontrado nas medidas de microdureza Vickers com 0,1 Kg de carga pode ser devido às medidas terem sido realizadas em matriz e carbonetos separadamente, enquanto que utilizando a carga de 1 Kg consegue-se abranger matriz e carboneto em uma mesma medida.

Os dois itens seguintes apresentam os resultados obtidos nas duas séries de ensaios de desgaste abrasivo bem como a discussão desses resultados. A primeira série de ensaios foi realizada no equipamento roda-de-borracha e a segunda no equipamento pino sobre lixa.

## 4.2. Ensaio: roda-de-borracha

### 4.2.1. Caracterização da superfície

As superfícies apresentaram uma rugosidade média de  $0,56 \mu\text{m}$  atendendo a Norma ASTM G-65, que determina uma rugosidade superficial menor que  $0,8 \mu\text{m}$  para os ensaios no equipamento roda-de-borracha. A topografia da superfície dessa amostra é mostrada na figura 4.1.

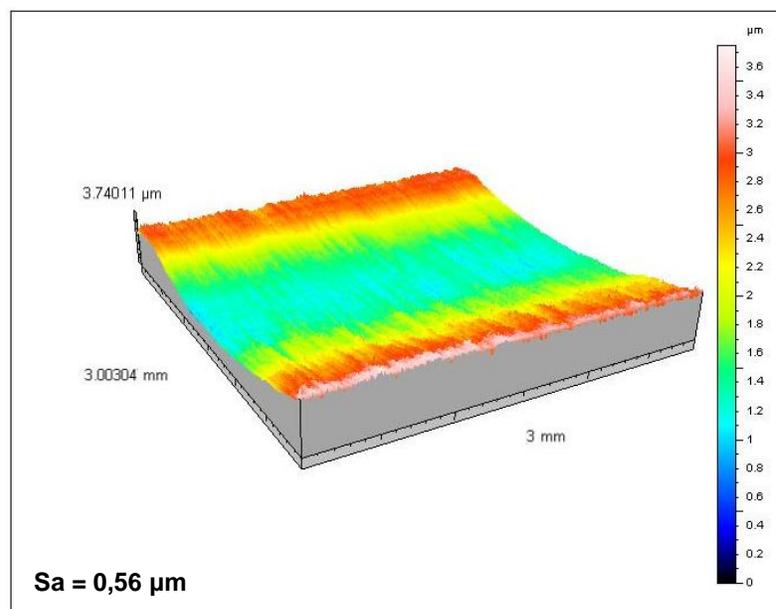


Figura 4-1 - Topografia da superfície gerada pelo analisador tridimensional de superfície da amostra de FFBAC para o ensaio no roda-de-borracha, após retifica.

### 4.2.2. Areia normal brasileira

Para o ensaio no roda-de-borracha utilizou-se como abrasivo o descarte fino da areia normal brasileira do IPT/SP peneirada em três intervalos de tamanhos: fina, média e grossa. Os gráficos da figura 4.2 mostram as distribuições granulométricas obtidas após o peneiramento da areia.

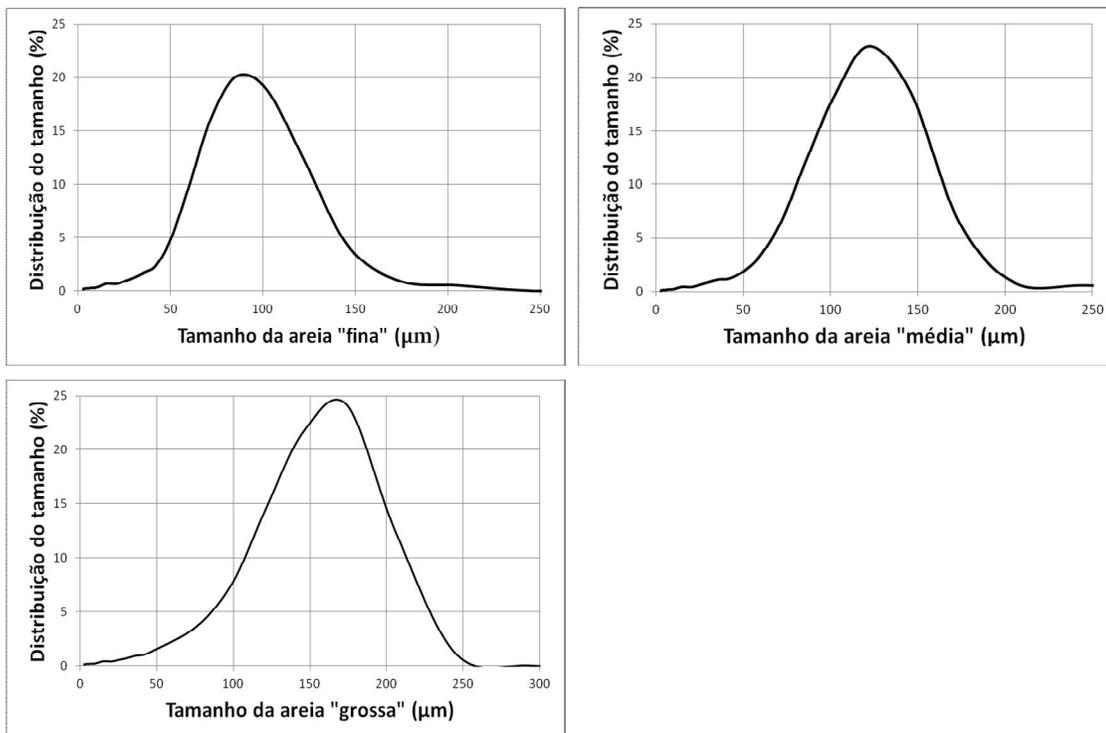


Figura 4-2 - Distribuição granulométrica da areia peneirada. Em (a) areia “fina” com tamanho de partícula entre 30  $\mu\text{m}$  e 142  $\mu\text{m}$ , em (b) areia “média” com intervalo de 52  $\mu\text{m}$  à 191  $\mu\text{m}$  e em (c) areia “grossa” de 64  $\mu\text{m}$  à 204  $\mu\text{m}$ .

A tabela 4.2 apresenta o nome dado aos intervalos, o valor da média correspondente ao intervalo e o desvio padrão de cada um. Os limites dos intervalos foram determinados com os índices  $d_{10}$  e  $d_{90}$ , respectivamente.

Tabela 4-2 - Classificação dos intervalos de tamanho da partícula abrasiva.

Nome	Intervalo de Tamanho do Abrasivo	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )
“Fina”	30 $\mu\text{m}$ - 142 $\mu\text{m}$	90	10
“Média”	52 $\mu\text{m}$ - 191 $\mu\text{m}$	115	15
“Grossa”	64 $\mu\text{m}$ - 204 $\mu\text{m}$	170	16

A Figura 4.3 ilustra o tamanho e a morfologia da areia utilizada no trabalho antes da realização dos ensaios.

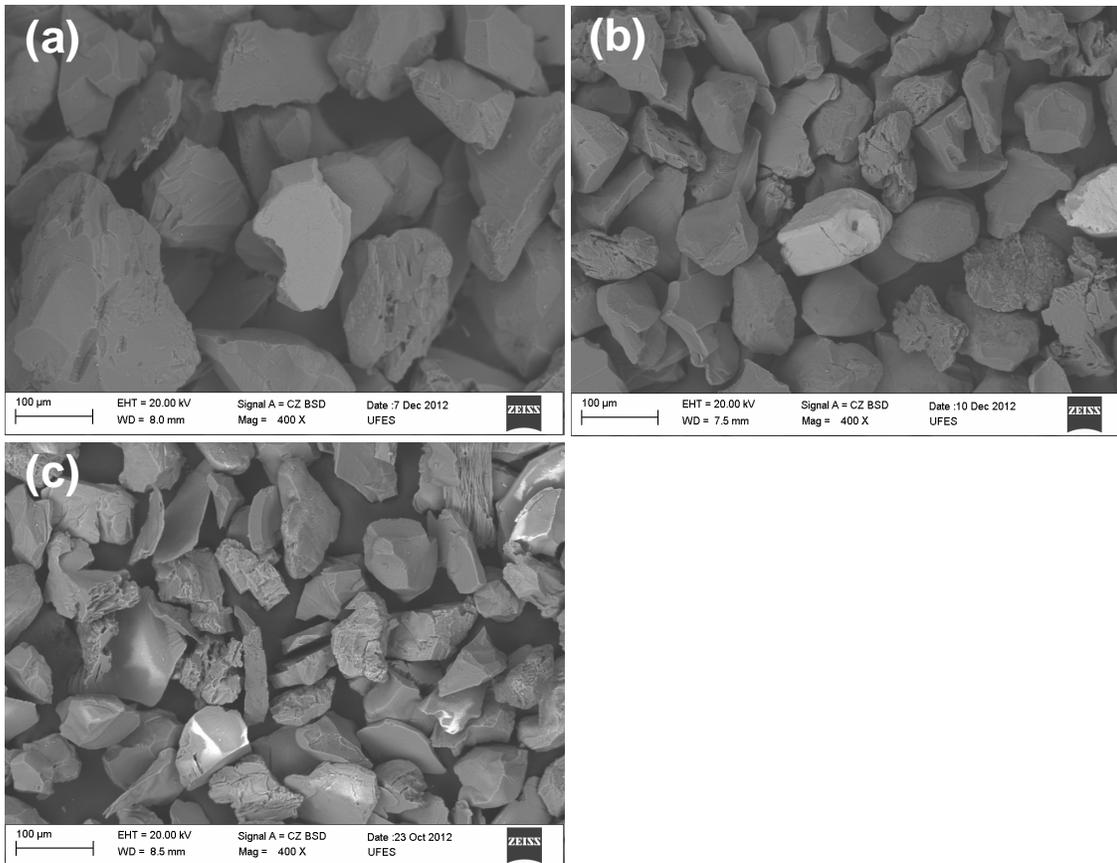


Figura 4-3 - Micrografia do MEV com aumento de 400x dos abrasivos antes dos ensaios no roda-de-borracha em (a) a areia “grossa” com tamanho médio de 170  $\mu\text{m}$ , (b) a areia “média” com tamanho médio de 115  $\mu\text{m}$  e (c) a areia “fina” com tamanho médio de 90  $\mu\text{m}$ .

Observe que os abrasivos de menor tamanho possuem pontas agudas e são bem finos como placas. Essa areia “fina” apresentou um fator de esfericidade menor (tabela 4.3) quando comparado com a areia “média” e “grossa” que são, também, facetados, porém não são finos.

Também foi realizada a análise da areia “fina” pós-ensaio mostrada na figura 4.4, nela nota-se a existência de pequenas partículas oriundas da cominuição da areia por causa da carga aplicada sobre a amostra durante o ensaio de desgaste. Observe nas figuras que quando aumenta a carga aumenta também a quantidade dessas partículas cominuídas.

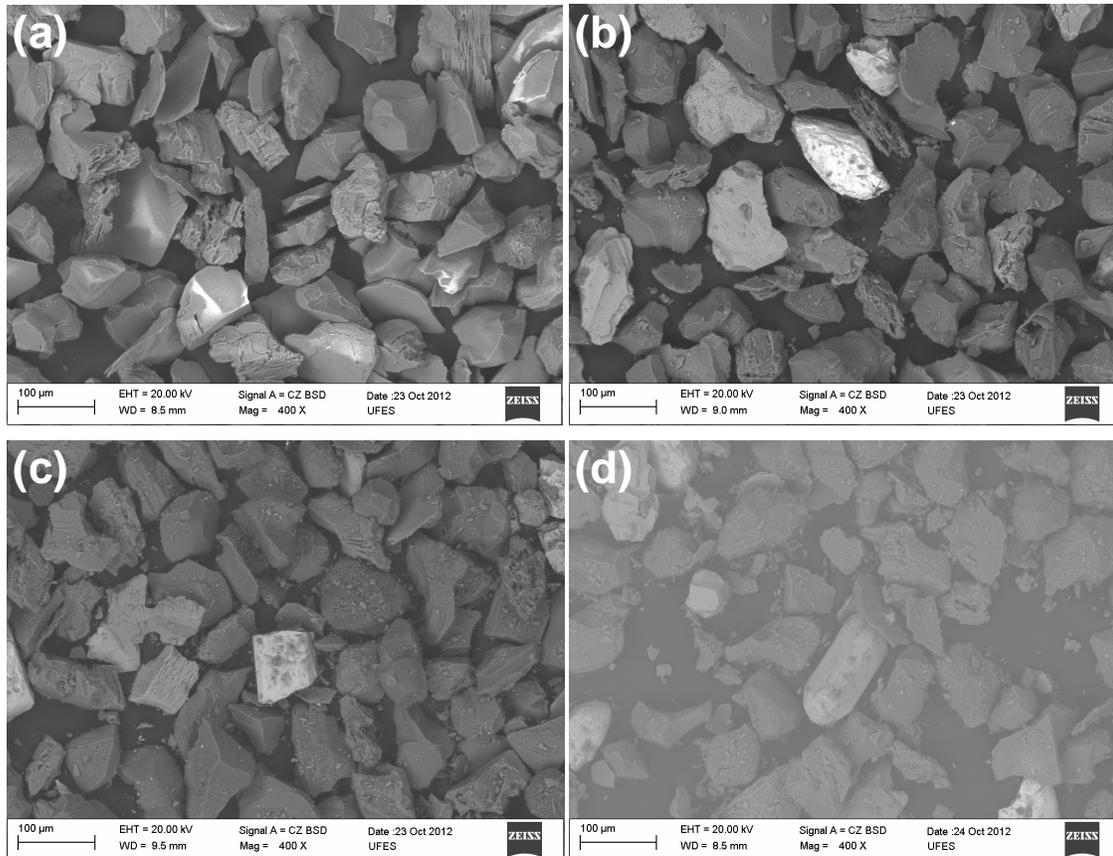


Figura 4-4 - Micrografia da areia “fina” com tamanho médio de 90  $\mu\text{m}$ . (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.

A figura 4.5 apresenta as micrografias da areia “média”, antes e depois da realização dos ensaios na roda-de-borracha variando a carga normal aplicada (44 N, 80 N e 130 N). Nessa figura após realização dos ensaios percebe-se o aparecimento de partículas pequenas oriundas da cominuição da areia.

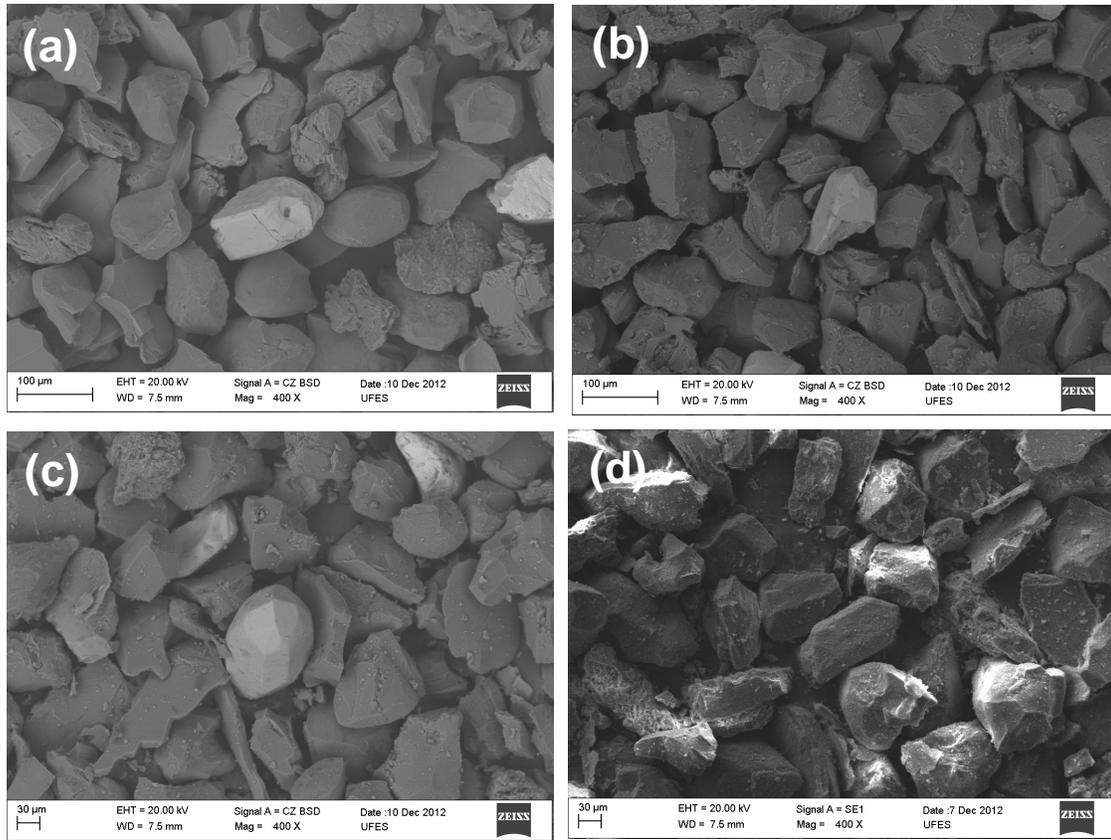


Figura 4-5 - Micrografia da areia “média” com tamanho médio de 115  $\mu\text{m}$ . (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.

Na figura 4.6 apresenta as micrografias da areia “grossa”, antes e depois da realização dos ensaios no roda-de-borracha e variando a carga normal, com aplicação dos ensaios, também, aparecem pequenas partículas entre as partículas maiores da areia.

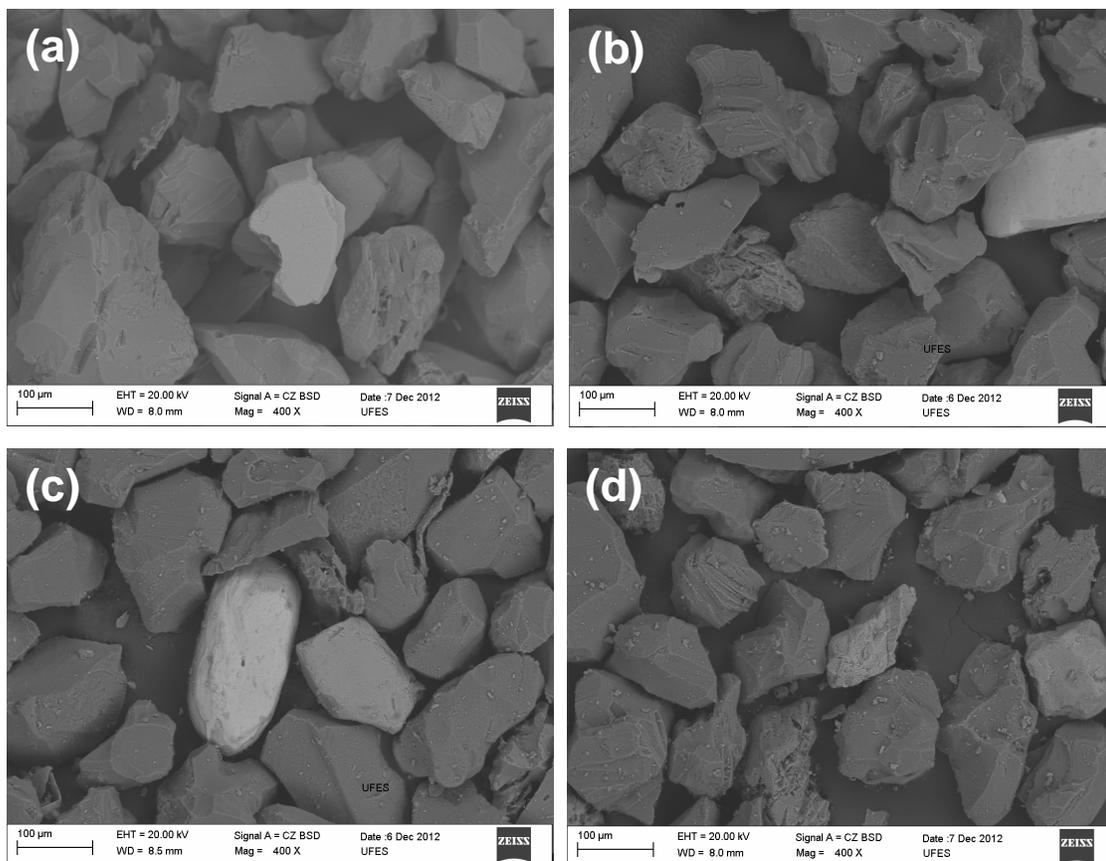


Figura 4-6 - Micrografia da areia “grossa” com tamanho médio de 170  $\mu\text{m}$ . (a) Antes da realização do ensaio no roda-de-borracha. E, após ensaio com aplicação da carga normal de: (b) 44 N; (c) 80 N e (d) 130N. Ampliação de 400 x.

Observando as micrografias da areia nota-se, de maneira geral, que não há muita variação no formado dos grãos abrasivos com a aplicação das cargas.

Isso pode ser comprovado analisado a tabela 4.3, de fator de esfericidade, nota-se na tabela que o valor do fator, praticamente, não varia quando observamos as areias “média” e “grossa”. Apenas a areia “fina” apresentou uma variação pouco maior, a aplicação da carga de 130 N tornou as partículas finas menos facetadas.

Tabela 4-3 - Fator de esfericidade das partículas abrasivas antes da realização dos ensaios e após os ensaios com carga de 130 N.

Tamanho do abrasivo	Fator de esfericidade ( $f_e$ )	
	Antes do ensaio	Após ensaio com carga de 130 N
"Fina"	0,57 ± 0,04	0,70 ± 0,02
"Média"	0,61 ± 0,03	0,67 ± 0,02
"Grossa"	0,61 ± 0,03	0,67 ± 0,03

#### **4.2.3. Resultados dos ensaios: roda-de-borracha**

Após realização dos ensaios no equipamento roda-de-borracha, como descrito no capítulo de materiais e métodos, foram medidos os valores de perda de massa das amostras e calculado o volume perdido no desgaste conforme a equação 3.2.

As tabelas do ensaio roda-de-borracha, confeccionadas conforme a Norma ASTM G-65, com os resultados dos ensaios são apresentadas no anexo C. Os gráficos dessa seção foram construídos com os resultados que estão nessas tabelas.

O gráfico da figura 4.7 foi elaborado com os valores do volume perdido nos ensaios em função da carga e do tamanho do grão abrasivo. Ele mostra um crescimento no desgaste com aumento da carga e tamanho do abrasivo.

Observe que a influência da carga no desgaste foi mais significativa para o maior tamanho de abrasivo. Observa na figura 4.7 quando a carga é triplicada: o volume perdido, para a areia "fina", aumenta em 2,5 vezes e, para a areia "grossa", aumenta em 3,5 vezes. VILLABON (2005) observou, também, uma maior influência da carga, para a areia maior, em ensaios realizados com o aço AISI 1004.

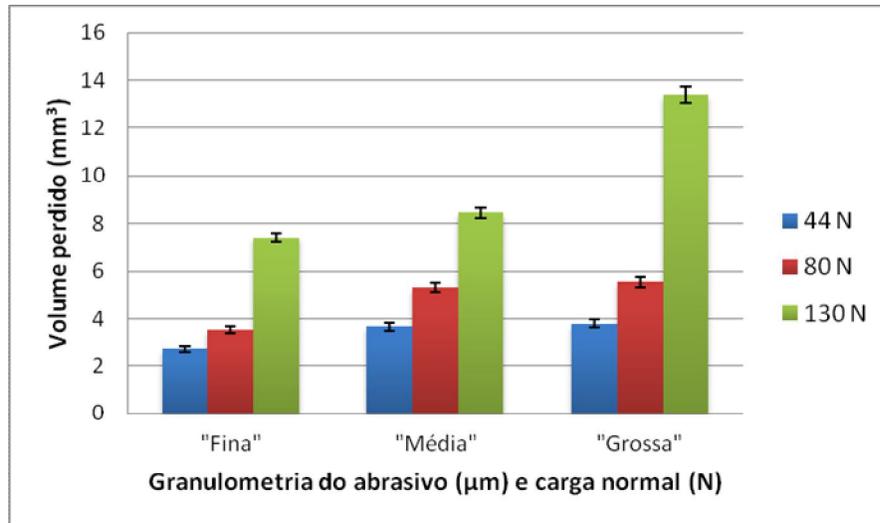


Figura 4-7 – Gráfico do volume perdido nos ensaios de desgaste realizados no equipamento roda-de-borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva.

O gráfico da figura 4.8 apresenta o comportamento no desgaste com a variação do tamanho da partícula abrasiva, mostrando mais claramente a ocorrência do fenômeno do tamanho crítico do abrasivo (TCA).

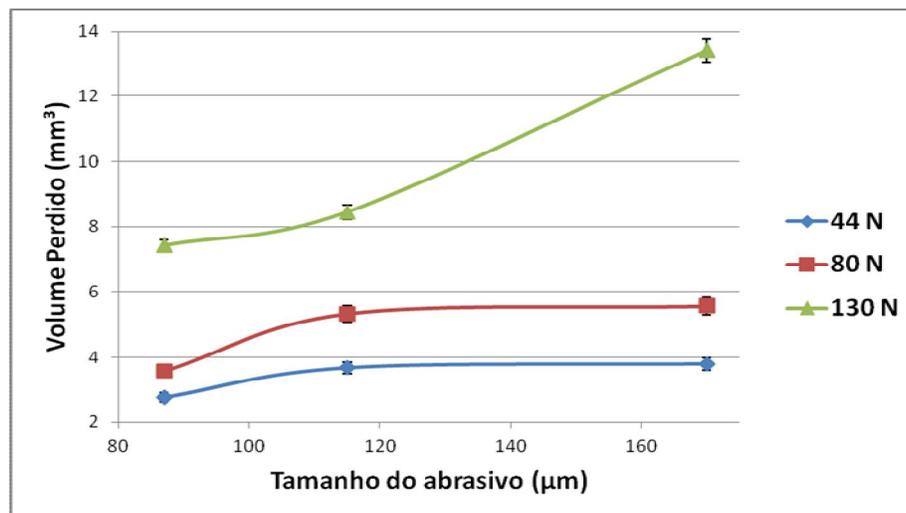


Figura 4-8 - Gráfico do volume perdido no ensaio de desgaste abrasivo realizado no equipamento roda-de-borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva.

Pode-se observar no gráfico da figura 4.8 que há um aumento no desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo até um TCA, entre 100 e 120  $\mu\text{m}$ , depois o

comportamento muda. Para as cargas menores (44 N e 80 N) o volume perdido no desgaste tornou-se independentes do tamanho do abrasivo como previsto na figura 2.4 em (2). Para a carga maior de 130 N, o volume perdido continua aumentando com uma inclinação maior.

O valor de TCA obtido nesses ensaios foi próximo ao valor de 100  $\mu\text{m}$ , encontrado por MISRA e FINNIE (1981).

O gráfico da figura 4.9 apresenta na ordenada um parâmetro de desgaste medido em  $\text{mm}^3/\text{N}$  e na abscissa o tamanho do grão abrasivo.

Interessante observar nesse gráfico que para a carga de 44 N, para todos os casos, o volume removido por unidade de força foi maior, com exceção da combinação mais severa (areia “grossa” e carga de 130 N). Apenas nos ensaios com areia “grossa” combinada com carga elevada (130 N) é que o volume removido por unidade de força foi maior, provavelmente, devida à introdução de um novo mecanismo de desgaste.

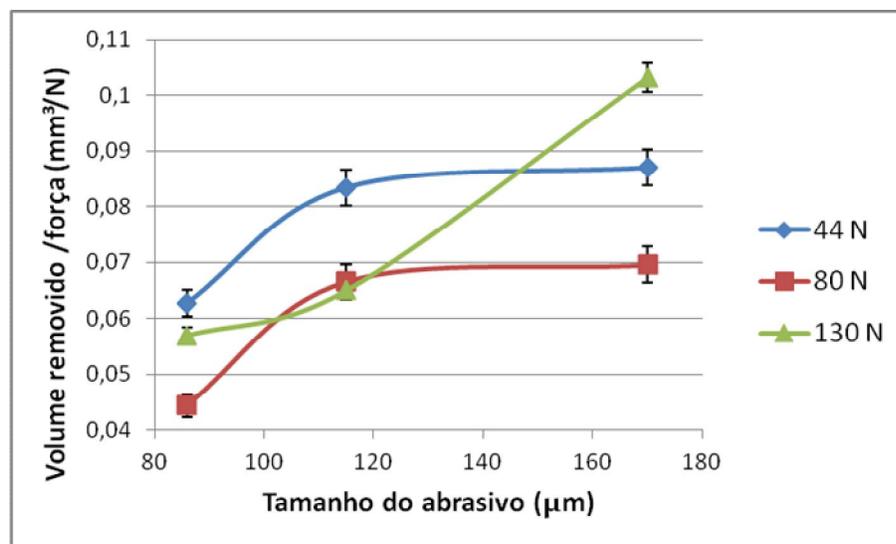


Figura 4-9 - Gráfico do desgaste medido em  $\text{mm}^3/\text{N}$ , nos ensaios roda-de-borracha, em função do tamanho da partícula abrasiva.

#### 4.2.4. Mecanismos de desgaste: roda-de-borracha

Os micromecanismos de desgaste foram analisados via micrografias das superfícies obtidas no MEV.

A figura 4.10 apresenta as superfícies desgastadas nos ensaios roda-de-borracha, realizados com areia “fina” variando a carga normal aplicada. E o gráfico correspondente.

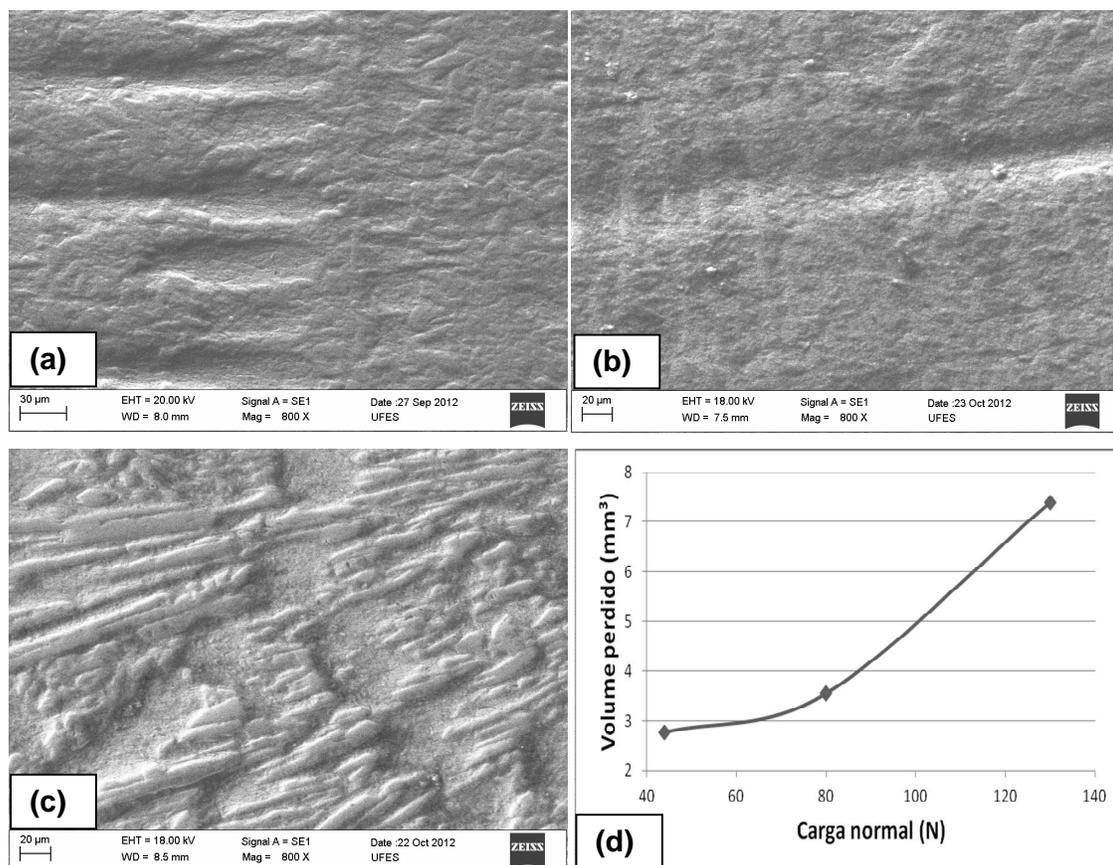


Figura 4-10 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “fina” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X.

Observe nas micrografias que os abrasivos menores conseguem entrar no espaço entre os carbonetos e desgastam a matriz martensítica, mas não

desgastam a rede de carbonetos. Na figura 4.10 (c) para os ensaios com carga de 130 N a remoção da matriz aparece mais profunda por causa da carga elevada, mas o carboneto se mantém íntegro.

A figura 4.11 mostra as superfícies desgastadas dos ensaios realizados no roda-de-borracha com areia “média” variando a carga normal aplicada. E o gráfico correspondente.

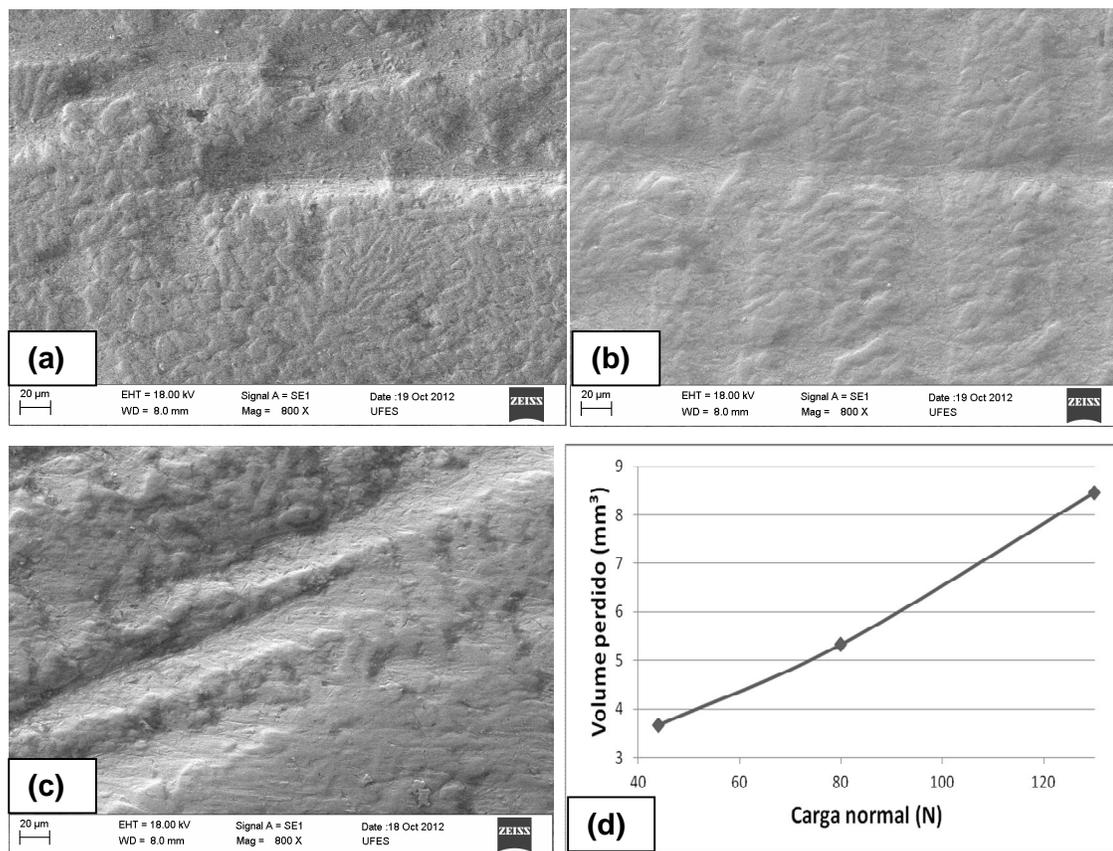


Figura 4-11 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “média” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X.

Na superfície de desgaste com areia de tamanho “médio” aconteceu algo semelhante à areia “fina”: desgaste na matriz martensítica e carbonetos íntegros.

A figura 4.12 têm as micrografias das superfícies desgastadas nos ensaios realizados no roda-de-borracha com a areia “grossa” variando a carga normal aplicada. E o gráfico correspondente.

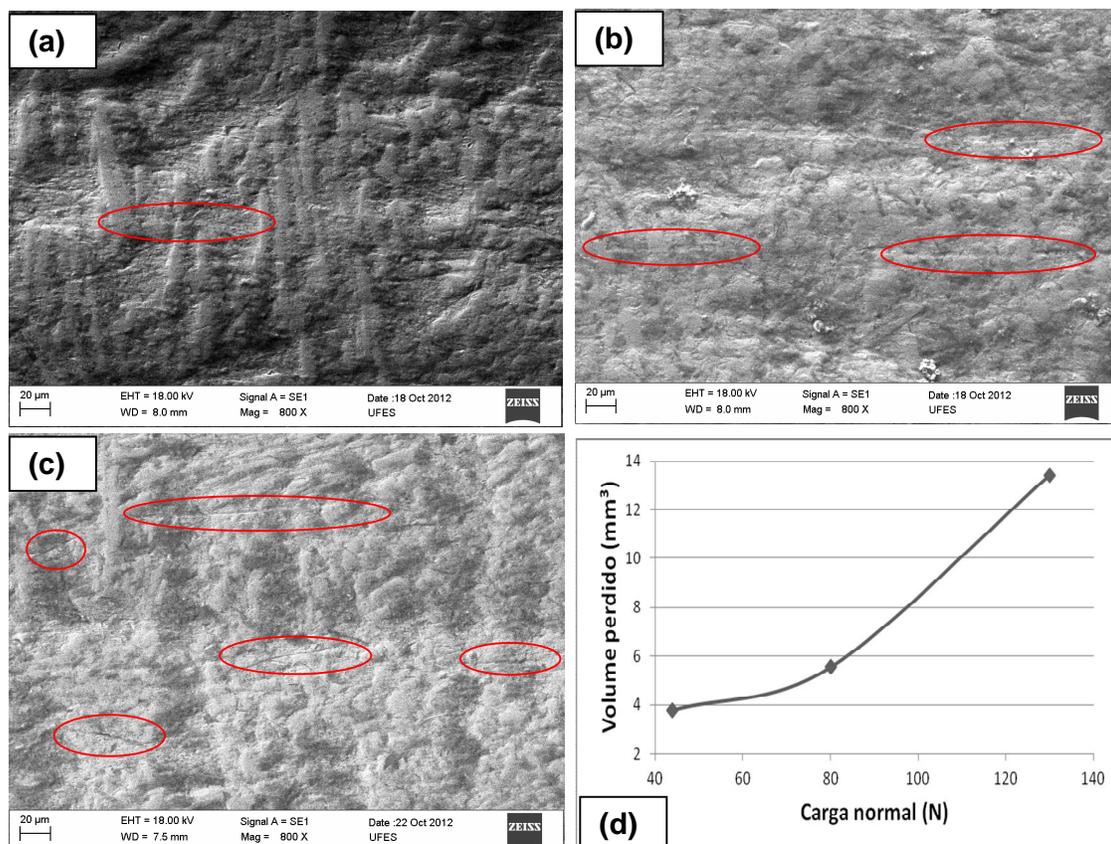


Figura 4-12 – Micrografias das superfícies após os ensaios de desgaste realizados com areia “grossa” no equipamento roda-de-borracha. Em (a) ensaio realizado com carga de 44 N, em (b) carga normal de 80 N, em (c) de 130 N e em (d) o gráfico do volume perdido em função da carga. Aumento de 800X. Em destaque nos círculos vermelhos estão os riscos mais profundos.

Para o ensaio de desgaste com a areia “grossa” foi observado desgaste na matriz martensítica, como também aconteceu no desgaste com as granulometrias menores, e alguns riscos mais profundos. Os riscos estão em destaque nos círculos vermelhos na figura 4.12.

Na micrografia da figura 4.12 (a), para a carga de 44 N, se observa um rebaixamento na matriz entre os carbonetos. Em (b), para a carga de 80 N, aparecem riscos pouco mais profundos e interrompidos. Já quando aumenta a carga para 130 N na micrografia em (c) observa-se um aumento na densidade de riscos que são ainda mais profundos.

#### 4.2.5. Rugosidade das superfícies: roda-de-borracha

Analisou-se a rugosidade das superfícies desgastadas das amostras para cada condição de ensaio no equipamento roda-de-borracha utilizando o parâmetro de rugosidade da superfície ( $S_q$ ). Com os valores do  $S_q$  foi construído o gráfico da figura 4.13. Observe que os resultados obtidos da análise topográfica corroboram com alguns dos resultados anteriores de volume perdido.

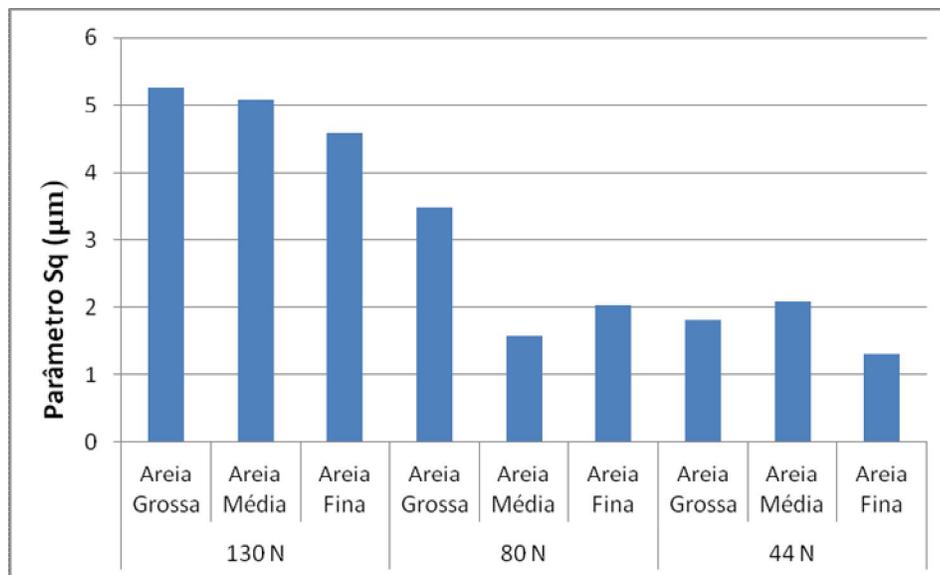


Figura 4-13 - Gráfico do parâmetro de rugosidade da superfície ( $S_q$ ) em função do tamanho da partícula abrasiva e da carga normal aplicada para os ensaios no equipamento roda-de-borracha.

Pode-se notar no gráfico da figura 4.13 uma influência maior da variação da carga do que do tamanho do abrasivo na alteração da rugosidade concordando

com os resultados obtidos, anteriormente, com a perda de massa, nos quais as maiores diferenças entre os valores de massa perdida ocorreram quando cargas diferentes foram aplicadas.

Pode ser observada uma relação entre o aumento da carga e o aumento do  $S_q$ , quando a carga foi triplicada o valor do  $S_q$ , também, triplicou. Para a variação do tamanho do abrasivo, quando o tamanho foi dobrado o  $S_q$  aumentou em uma razão de até 1,7 vezes.

A figura 4.14 mostra as topografias das superfícies desgastadas após realização de ensaio no roda-de-borracha com a areia “grossa” variando a carga. Também é mostrada a topografia da superfície antes dos ensaios.

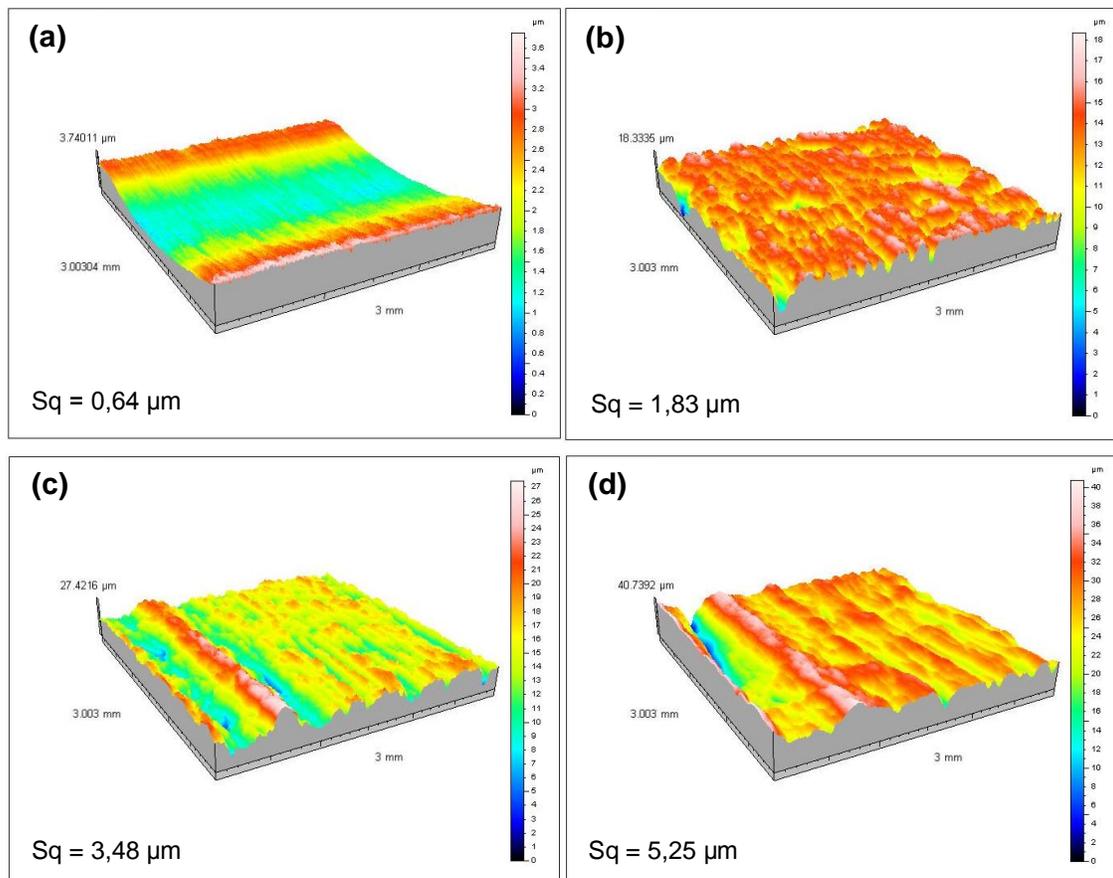


Figura 4-14 – (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastada após os ensaios realizados com a areia “grossa”: em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.

Observando as topografias da figura 4.14 nota-se, claramente, um aumento na rugosidade da superfície com aumento da carga.

Na figura 4.15 estão as topografias das superfícies desgastadas nos ensaios realizados com areia de tamanho “médio” e a topografia antes dos ensaios. Nessa figura nota-se, também, um aumento na rugosidade com o aumento da carga.

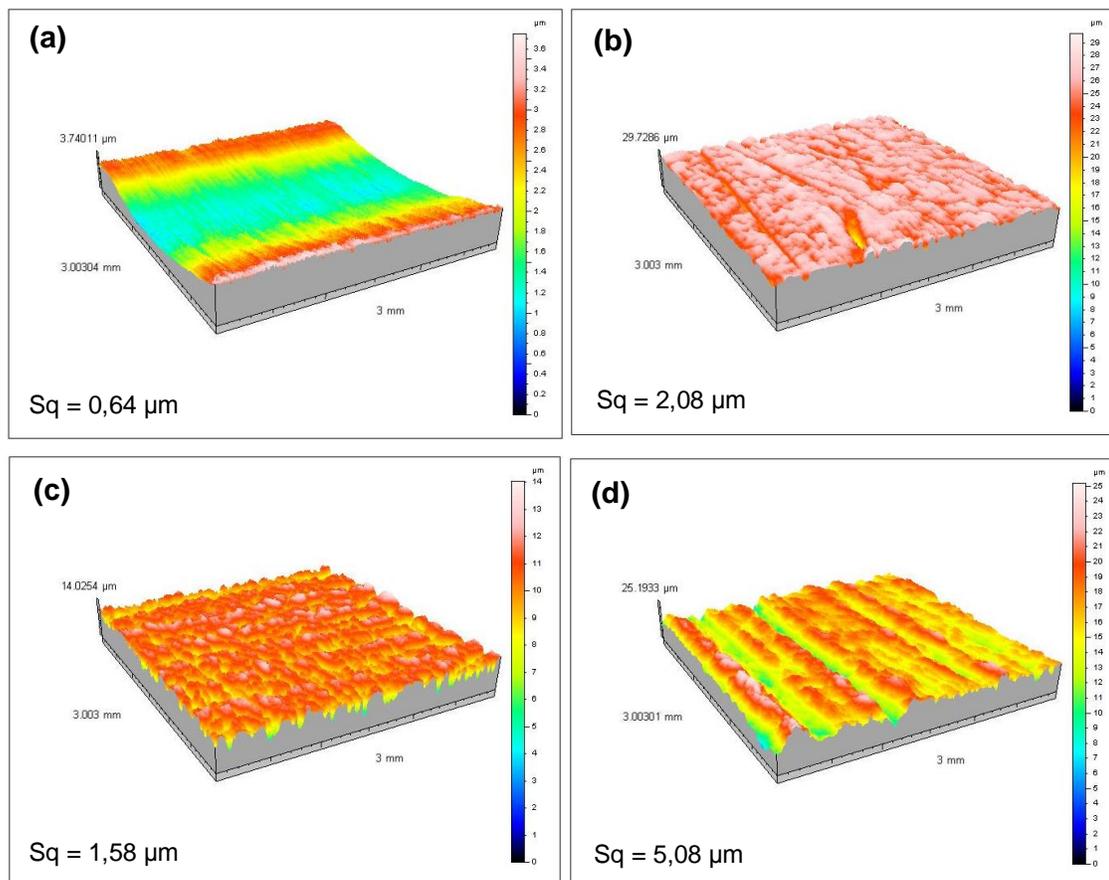


Figura 4-15 - (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastadas após os ensaios realizados com a areia “média” em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.

A figura 4.16 apresenta as topografias das superfícies desgastadas nos ensaios realizados com abrasivo “fino” e a topografia antes dos ensaios. Nessa figura observa-se, também, um aumento na rugosidade das superfícies com aumento da carga.

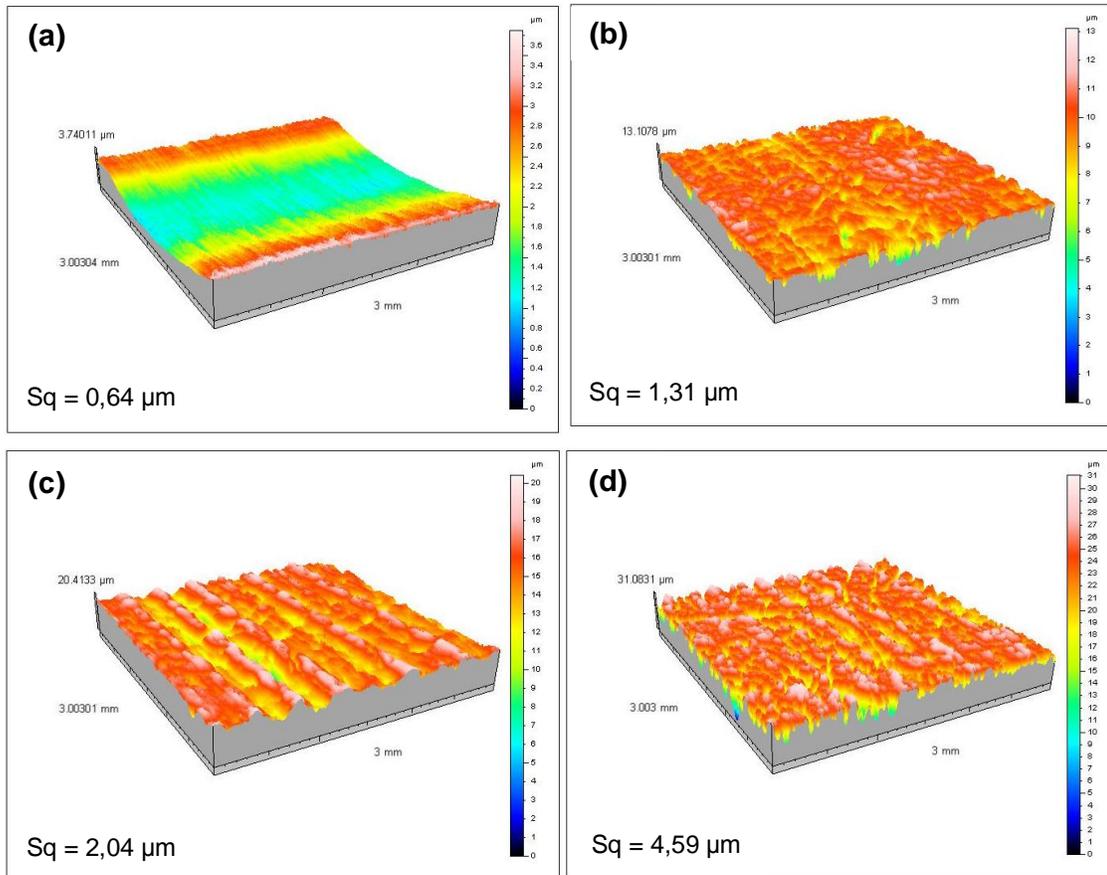


Figura 4-16 - (a) Topografia da superfície antes do ensaio roda-de-borracha. Topografia das superfícies desgastadas após os ensaios realizados com a areia “fina” em (b) com carga normal de 44 N, em (c) 80 N e em (d) 130 N.

Comparando as figuras 4.14 e 4.16 pode-se notar uma maior rugosidade nas superfícies onde foram realizados os ensaios com o abrasivo maior.

#### 4.3. Ensaio: pino sobre lixa

##### 4.3.1. Caracterização da superfície

Foi selecionado um pino para análise topográfica da superfície antes da realização dos ensaios de desgaste.

A superfície do pino após a retífica apresentou um parâmetro de rugosidade média  $S_a = 0,24 \mu\text{m}$ . A topografia da superfície do pino gerada pelo analisador tridimensional de superfícies é mostrado na figura 4.17.

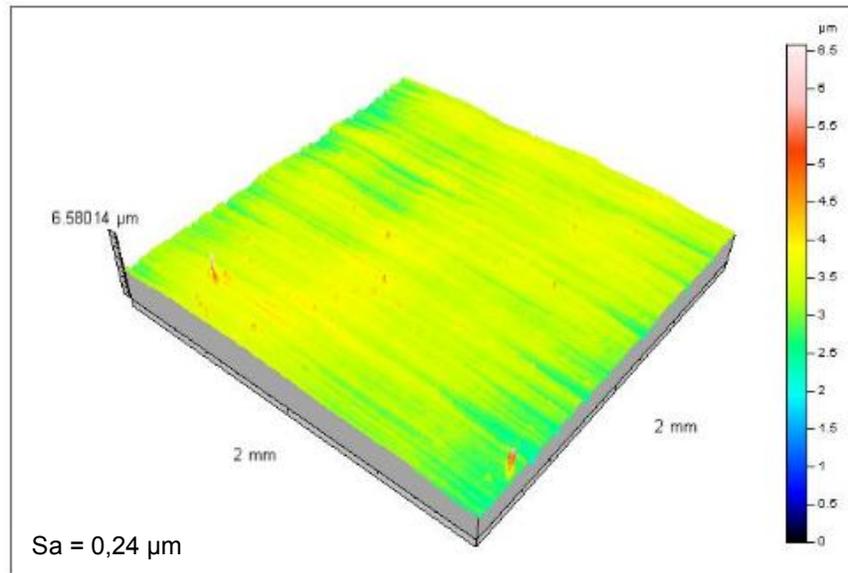


Figura 4-17 – Topografia da superfície retificada do pino de FFBC utilizado para realização dos ensaios pino sobre lixa, obtida do analisador tridimensional de superfícies.

#### **4.3.2. Resultados dos ensaios: pino sobre lixa**

O volume perdido no desgaste foi calculado com a equação 3.2 utilizando a diferença entre a massa do pino medida antes e depois da realização de cada ensaio (essas medidas estão em tabelas no anexo D).

Com os valores dos volumes perdidos nos ensaios foi elaborado o gráfico da figura 4.18 com o volume perdido na ordenada; e com a carga, o tamanho do abrasivo e o material da lixa na abscissa. Nesse gráfico estão todos os resultados obtidos nos ensaios pino sobre lixa.

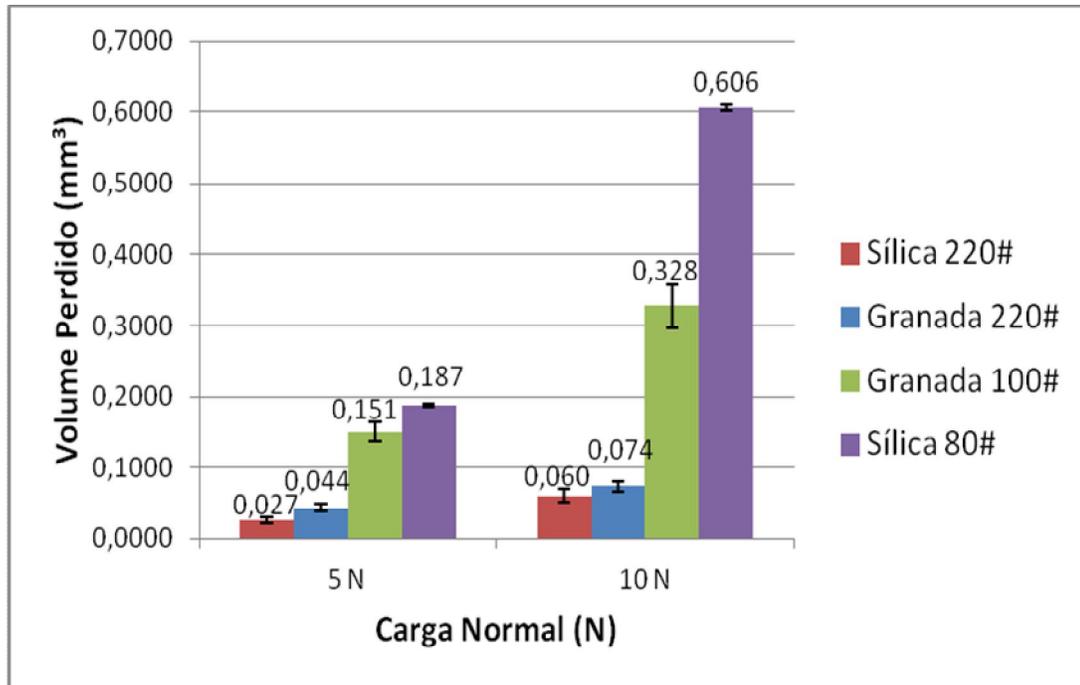


Figura 4-18 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal, do tamanho da partícula abrasiva e do material da lixa.

Na figura acima nota-se o crescimento no volume perdido com aumento da carga e do tamanho do abrasivo. Observando apenas as lixas de sílica e granada com mesmo tamanho de grão abrasivo (220#), percebe-se uma pequena diferença na perda de massa, maior para a lixa de granada. Observe, para a carga de 5 N e mesmo tamanho de abrasivo (220#), um fator de aumento de, aproximadamente, 1,6 vezes na mudança da lixa de sílica para granada.

Os gráficos das figuras 4.19 e 4.20 enfatizam o aumento do volume perdido no desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo. Pode ser observado que, para a carga maior, o crescimento no desgaste foi mais acelerado. O volume perdido, praticamente, dobrou com o aumento da carga para a lixa de granada e triplicou para a lixa de sílica. Nota-se, também, que para o menor tamanho de abrasivo, a carga não teve muita influência no desgaste.

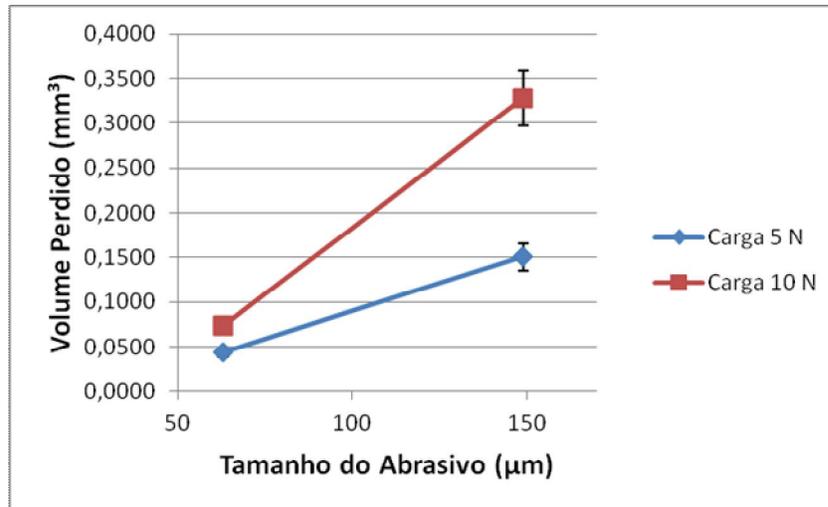


Figura 4-19 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal e tamanho da partícula abrasiva. Lixa de granada.

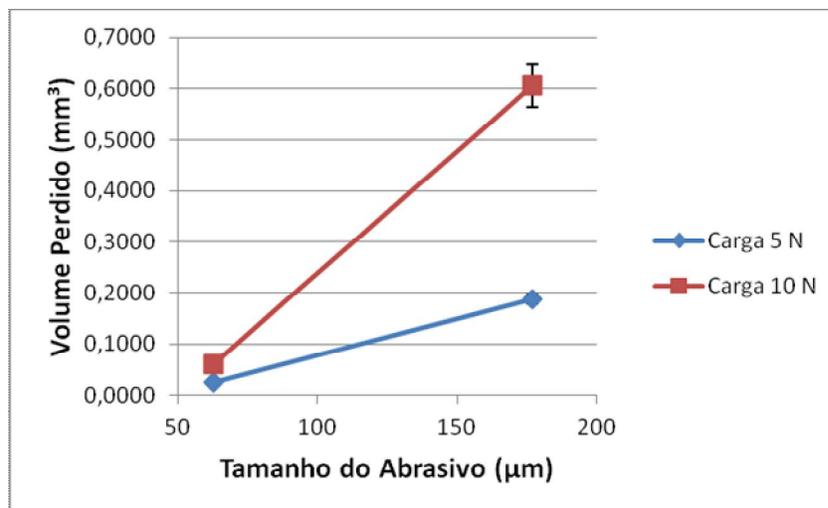


Figura 4-20 - Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no equipamento pino sobre lixa em função da carga normal e tamanho da partícula abrasiva. Lixa de sílica.

#### 4.3.3. Mecanismos de desgaste: pino sobre lixa

A figura 4.21 apresenta as micromecanismos de desgaste obtidos via observação no MEV dos pinos ensaiados com lixa de granada variando o tamanho do abrasivo e a carga normal aplicada.

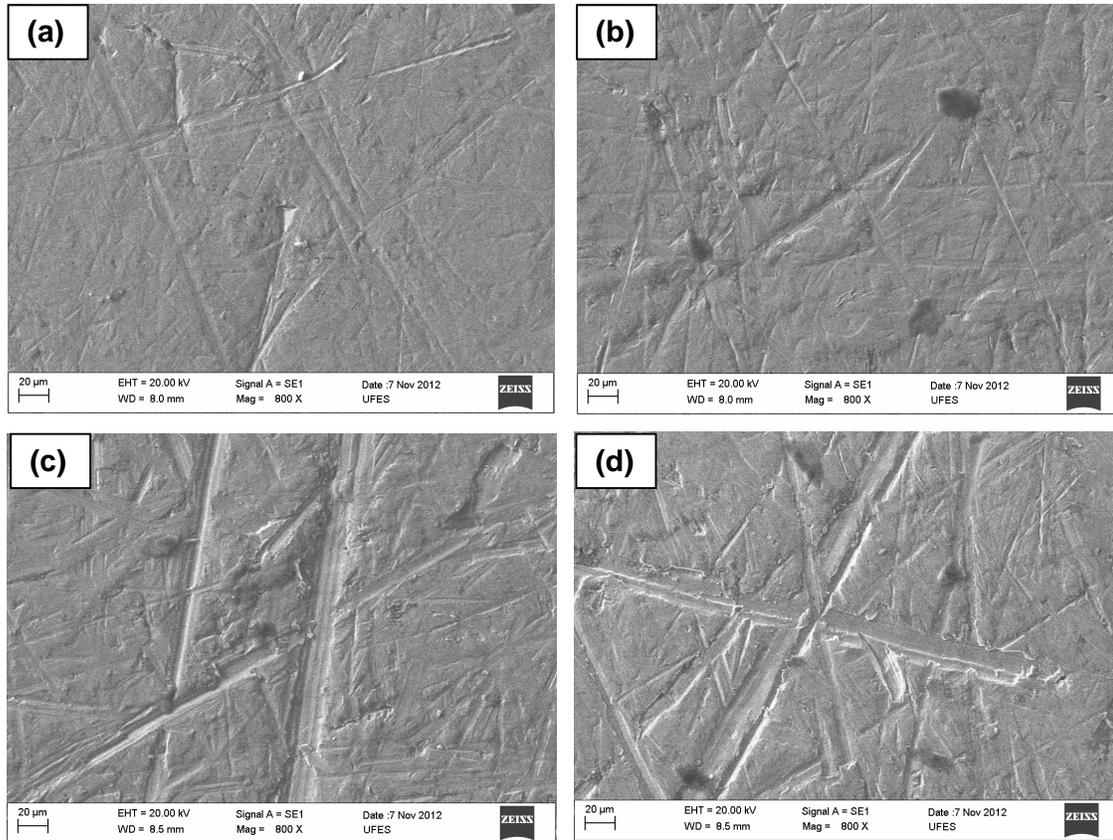


Figura 4-21 - Micrografias das superfícies dos pinos após realização de ensaios de desgaste pino sobre lixa de granada. Em (a) lixa de granulometria 220# (63  $\mu\text{m}$ ) e carga normal de 5 N; em (b) lixa 220# e carga de 10 N; em (c) lixa 100# (149  $\mu\text{m}$ ) e carga de 5 N e em (d) lixa 100# e carga de 10 N. Aumento de 800X.

Pode-se observar na figura acima, o aumento na largura, no comprimento e na densidade dos riscos com aumento da carga normal e com o aumento do tamanho do abrasivo.

A fim de quantificar a variação na densidade, largura e comprimento dos riscos, observada nas micrografias anteriores, foi construída a tabela 4.4.

Tabela 4-4 - Tabela de densidades de riscos nas superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de granada. Ensaio em lixa de 220# e carga normal de 5 N; com lixa de 100# e carga de 10 N, relativas às micrografias da figura 4.22 (a) e (d), respectivamente .

Tabela de densidade de riscos (lixa de granada):			
Lixa de Granada		220# e 5 N	100# e 10 N
Nº de riscos/ $\mu\text{m}^2$		$3,5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$
Total de riscos		31	26
Maiores	Nº de riscos	6	8
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	224	261
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	4	10
Médios	Nº de riscos	8	6
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	118	174
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	3	5
Menores	Nº de riscos	16	11
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	38	60
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	3	4

A tabela 4.4 possui a densidade de riscos calculada para duas condições de desgaste, e apesar dos valores encontrados serem parecidos, para a maior carga e maior tamanho de grão abrasivo, os riscos são maiores e mais largos.

A figura 4.22 mostra as micrografias das superfícies após ensaio de desgaste no pino sobre lixa, para as lixas de sílica, variando a carga normal aplicada sobre a amostra e o tamanho do grão abrasivo.

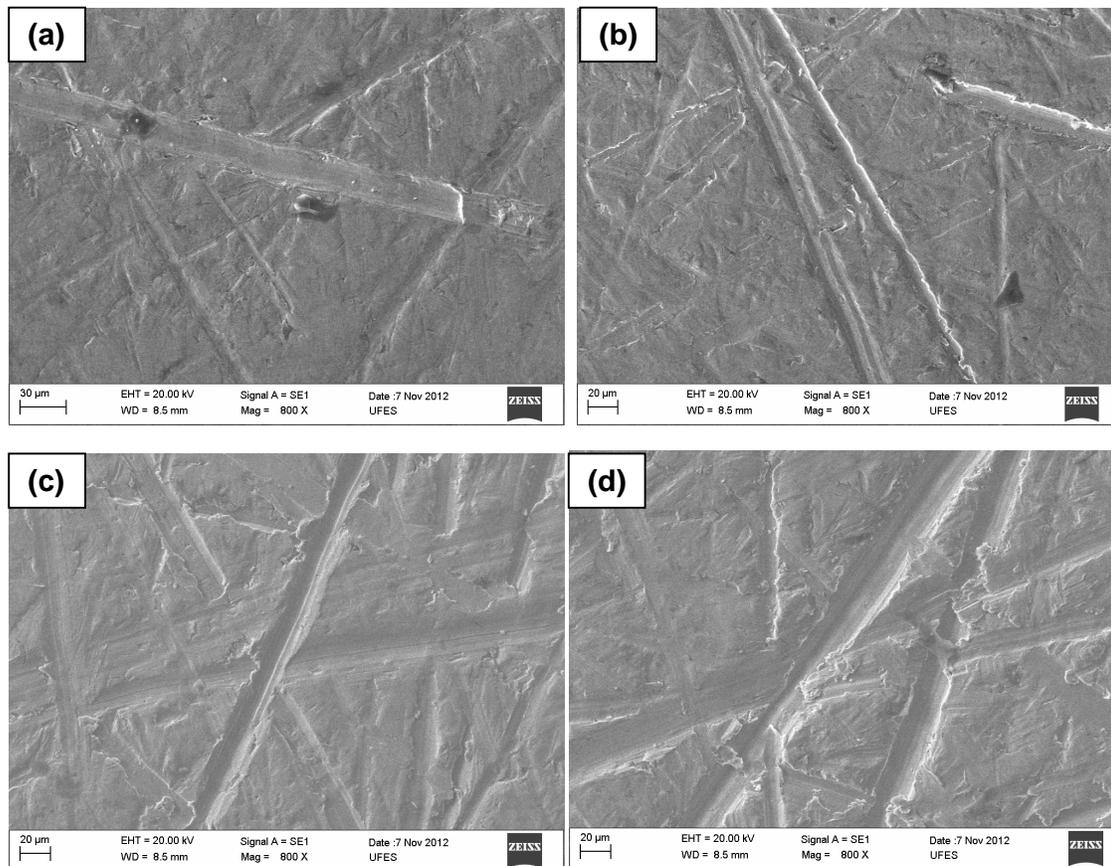


Figura 4-22 - Micrografias da superfície do pino após ensaio de desgaste pino sobre lixa de sílica. Em (a) lixa de granulometria 220# (63  $\mu\text{m}$ ) e carga normal de 5 N; em (b) lixa 220# e carga de 10 N; em (c) lixa 80# (177  $\mu\text{m}$ ) e carga de 5 N e em (d) lixa 80# e carga de 10 N. Aumento de 800X.

É visível nas micrografias da figura 4.22 um aumento na densidade de riscos, na largura, comprimento e profundidade com aumento da carga e do tamanho do abrasivo.

Na tabela 4.5 podem-se comparar os extremos dos ensaios, quanto à variação na densidade, no comprimento e na largura dos riscos. Nesta tabela estão os valores calculados das densidades dos riscos e, também, os valores medidos da largura e do comprimento para as condições: 220# e 5 N; 80# e 10 N. Para a lixa de sílica.

Tabela 4-5 - Tabela de densidades de riscos nas superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de sílica. Ensaio em lixa de 220# e carga normal de 5 N; e, em lixa de 80# e carga de 10 N, relativas às micrografias da figura 4.23 (a) e (d), respectivamente.

Tabela de densidade de riscos (lixa de sílica):			
Lixa de Sílica		220# e 5 N	80# e 10 N
Nº de riscos/ $\mu\text{m}^2$		$3,6 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
Total de riscos		29	28
Maiores	Nº de riscos	4	3
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	251	273
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	13	23
Médios	Nº de riscos	6	5
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	83	200
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	6	13
Menores	Nº de riscos	19	20
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	28	51
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	4	6

Observa-se, na tabela acima, uma densidade de riscos próxima, porém para a carga e tamanho de abrasivo maiores o comprimento e a largura dos riscos, em média, também foram maiores.

A tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os ensaios com lixa de sílica e com lixa de granada, nota-se na tabela uma pequena diferença na densidade de riscos. Uma diferença maior aparece quando comparamos a largura e o comprimento dos riscos que são, em geral, maiores para o desgaste com lixa de sílica.

Tabela 4-6 - Tabela para comparação de densidades, larguras e comprimentos dos riscos das superfícies desgastadas em ensaio pino sobre lixa, para a lixa de sílica e a lixa de granada. Relativas às micrografias da figura 4.23 (a) e (d) e figura 4.22 (a) e (d).

<b>Tabela de densidade de riscos:</b>					
		Lixa de Sílica		Lixa de Granada	
Condições de Ensaio:		220# 5 N	80# 10 N	220# 5 N	100# 10 N
Nº de riscos/ $\mu\text{m}^2$		$3,6 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$
Total de riscos		29	28	31	26
Maiores	Nº de riscos	4	3	6	8
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	251	273	224	261
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	13	23	4	10
Médios	Nº de riscos	6	5	8	6
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	83	200	118	174
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	6	13	3	5
Menores	Nº de riscos	19	20	16	11
	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	28	51	38	60
	Largura ( $\mu\text{m}$ )	4	6	3	4

#### **4.3.4. Rugosidade das superfícies: pino sobre lixa**

Analisou-se a rugosidade das superfícies desgastadas dos pinos para cada condição de ensaio. Os valores do parâmetro de rugosidade da superfície ( $S_q$ ) foram utilizados para a construção do gráfico da figura 4.23.

Observe que os resultados obtidos da análise topográfica das superfícies desgastadas corroboram com alguns dos resultados anteriores de perda de massa e da observação das micrografias (quantidade, comprimento e largura dos riscos). A rugosidade da superfície resultante dos ensaios com mesmo tamanho de abrasivo, comparando as lixas de sílica e granada ficou bem parecida apesar da perda de massa ter sido maior nas amostras submetidas aos ensaios com a lixa de sílica.

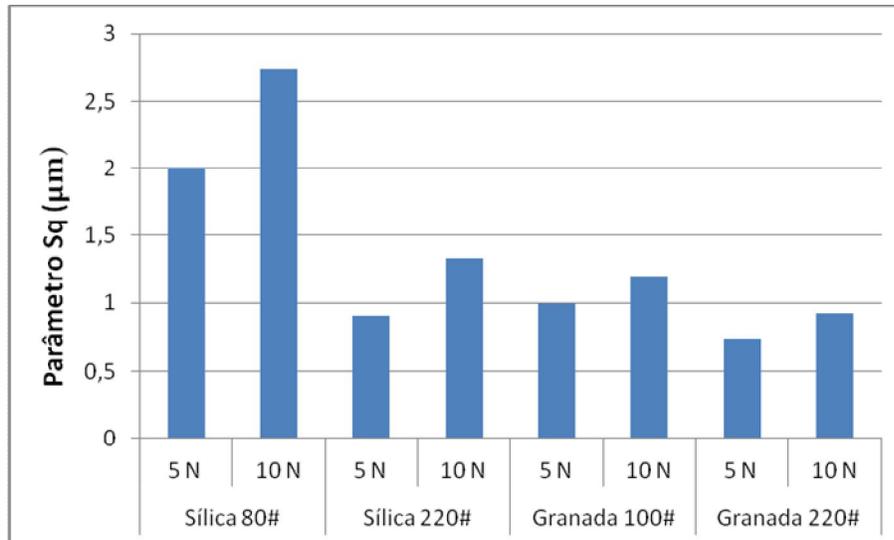


Figura 4-23 – Gráfico do parâmetro de rugosidade (Sq) das superfícies desgastadas dos pinos do ensaio pino sobre lixa em função do material, do tamanho do abrasivo e da carga normal.

Analisando o gráfico da figura 4.23 nota-se que os pinos ensaiados com a aplicação da carga mais elevada e maior tamanho de abrasivo apresentaram as superfícies com os maiores valores de rugosidade. Pode-se observar, também, que para a lixa de sílica quando dobra a carga, o Sq da superfície aumenta numa razão, aproximada, de 1,5. Enquanto que para a lixa de granada aumenta em 1,2 vezes.

A figura 4.24 mostra as topografias das superfícies resultantes dos ensaios de desgaste pino sobre lixa de sílica, pode-se, claramente, notar a diferença na rugosidade das superfícies dos pinos com a variação da carga e do tamanho da partícula abrasiva.

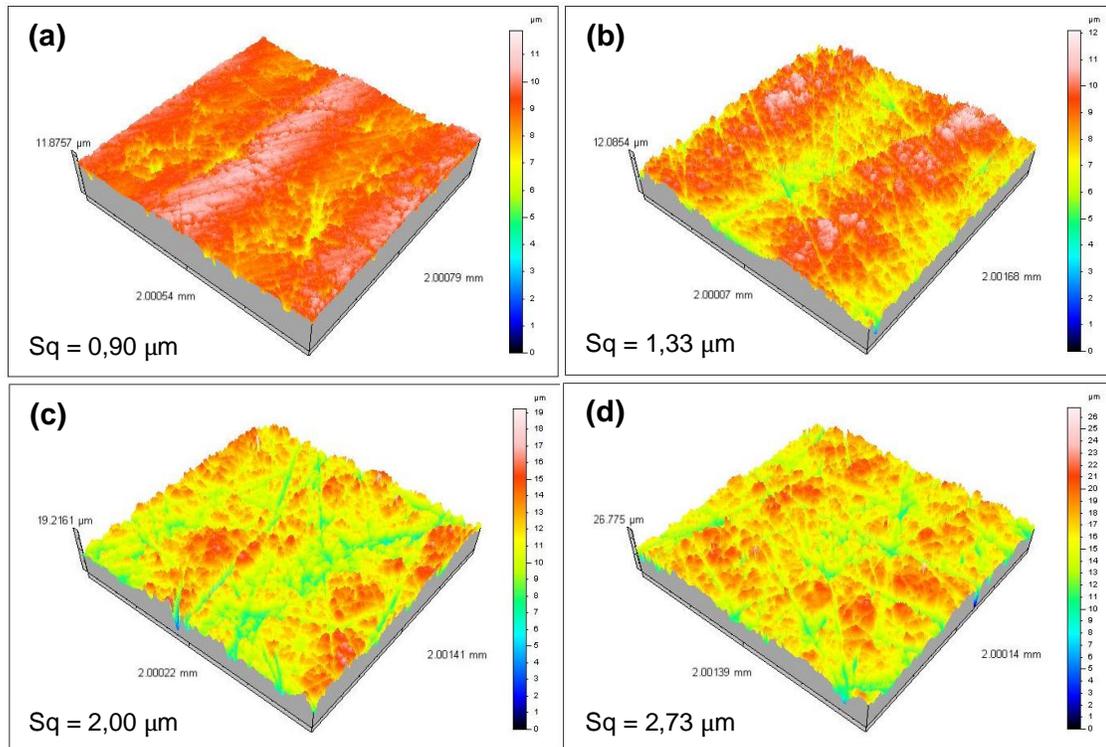


Figura 4-24 - Topografia das superfícies desgastadas no ensaio pino sobre lixa de sílica com granulometria de 220# (63 µm) e carga normal: (a) 5 N e (b) 10 N. Granulometria de 80# (177 µm) e carga normal: (c) 5 N e (d) 10 N.

A figura 4.25 mostra as topografias das superfícies resultantes dos ensaios de desgaste pino sobre lixa de granada, onde também se pode notar diferença na rugosidade das superfícies dos pinos com a variação da carga e do tamanho da partícula abrasiva.

Comparando as figuras 4.24 e 4.25 observa-se que as lixas de sílica produziram superfícies com maior Sq.

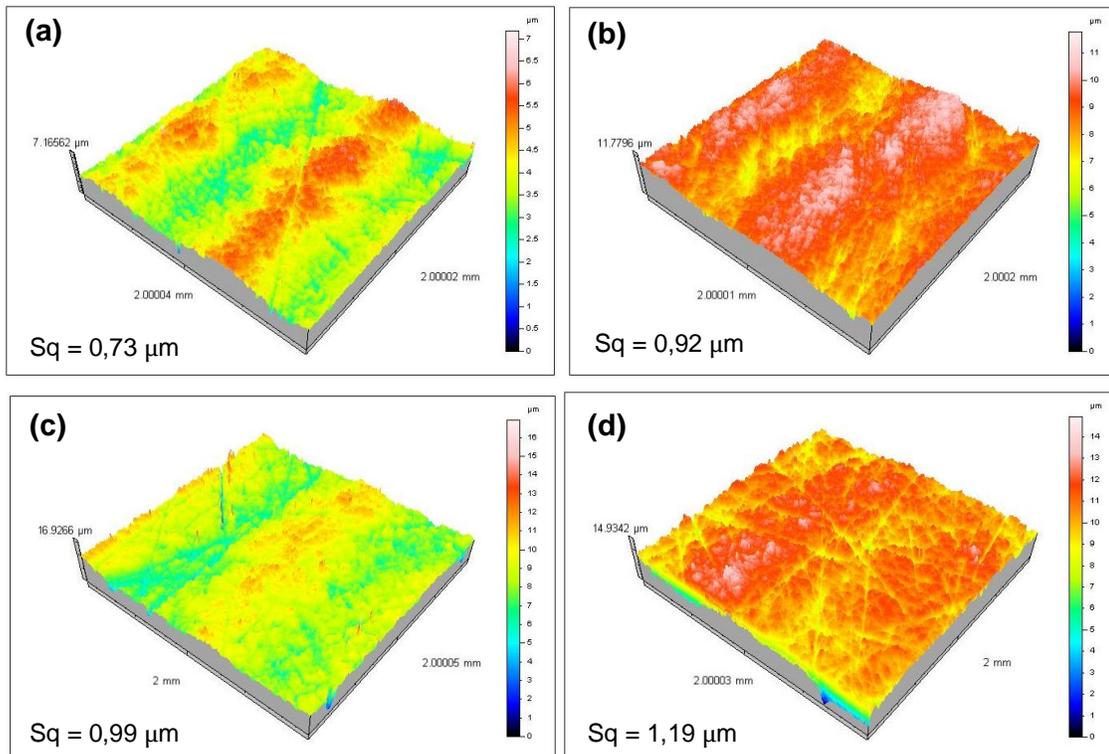


Figura 4-25 - Topografia das superfícies desgastadas nos ensaios pino sobre lixa de granada com granulometria de 220# (63  $\mu\text{m}$ ) e carga normal: (a) 5 N e (b) 10 N. Granulometria de 100# (149  $\mu\text{m}$ ) e carga normal: (c) 5 N e (d) 10 N.

#### 4.4. Mapa de desgaste

Inspirado no mapa de desgaste de RIAHI e ALPAS (2003), com o logaritmo dos valores do volume perdido dividido pela carga e pela distância percorrida no desgaste em função do tamanho do abrasivo foi idealizado um mapa de desgaste para o FFBC, mostrado na figura 4.26, para os ensaios no roda-de-borracha e no pino sobre lixa. Com destaque para os mecanismos de desgaste mostrados nas micrografias do MEV.

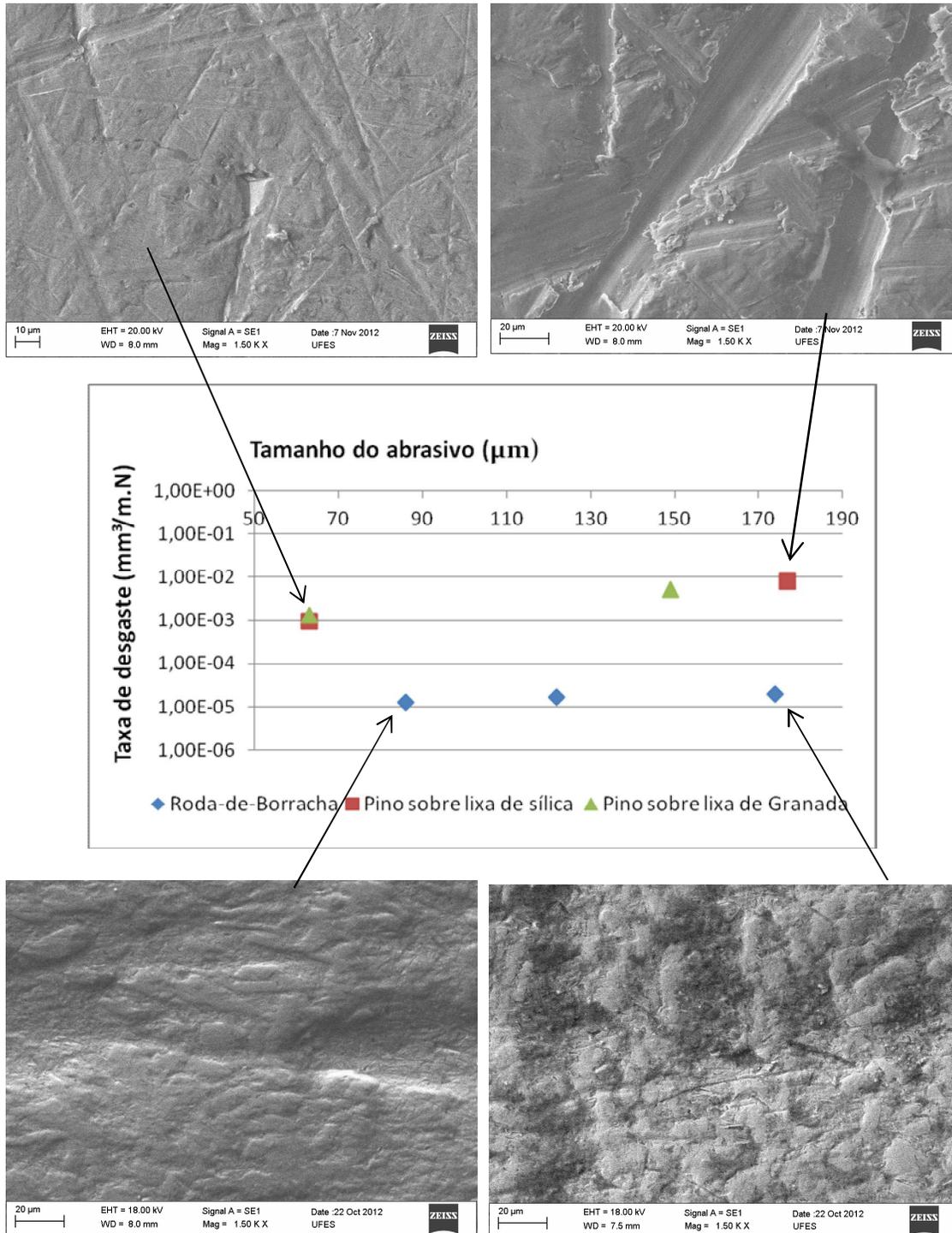


Figura 4-26 – Mapa de desgaste abrasivo do FFBAC 19,9% Cr e 2,9% C, para ensaios com dois níveis distintos de severidade, variando a carga normal e o tamanho da partícula abrasiva. Destaque para as micrografias das superfícies desgastadas.

Observe na figura 4.26 que as maiores taxas de desgaste correspondem aos ensaios no equipamento pino sobre lixa.

O ensaio no roda-de-borracha resultou nas menores taxas de desgaste com diferença de mais de duas ordens de grandeza comparando com os ensaios no equipamento pino sobre lixa, para o maior tamanho de abrasivo.

MISRA e FINNIE (1980) obtiveram uma diferença de, aproximadamente, uma ordem de grandeza no volume perdido comparando os dois tipos de ensaios com rolamento e deslizamento de abrasivo variando a carga aplicada.

Outra observação que pode ser feita é quanto à mudança de uma ordem de grandeza no desgaste quando aumenta o tamanho do grão abrasivo para o ensaio pino sobre lixa, o mesmo não foi observado nos resultados do roda-de-borracha.

No Anexo E é encontrado o cálculo utilizado para a determinação das taxas de desgaste parametrizadas da figura 4.26.

O capítulo seguinte apresentará as principais conclusões obtidas após a análise e interpretação dos resultados.

## 5. CONCLUSÕES

Referentes aos ensaios no roda-de-borracha:

1. Quanto maior o tamanho do abrasivo, maiores as taxas de desgaste, assim como, para cada grupo de mesmo tamanho de abrasivo, quanto maior a carga maior o desgaste.

2. Quanto à rugosidade da superfície de desgaste, há uma tendência clara de que quando aumenta a carga aumenta o parâmetro de rugosidade  $S_q$ .

3. Quanto aos mecanismos de desgaste, para a menor carga e menor tamanho de abrasivo, foi observado apenas o desgaste na matriz, porém os carbonetos se mantiveram íntegros. Com carga mais elevada e maior tamanho de abrasivo, foram observados riscos mais profundos e contínuos.

Referentes aos ensaios no pino sobre lixa:

4. Quanto maior o tamanho do abrasivo, maiores as taxas de desgaste, assim como, para cada grupo de mesmo tamanho de abrasivo, quanto maior a carga maior o desgaste. Para um mesmo tamanho de abrasivo e carga, o desgaste foi menor quando empregada à lixa de sílica em relação à lixa de granada.

5. Quanto à rugosidade da superfície de desgaste, houve aumento no parâmetro de rugosidade  $S_q$  com aumento da carga e do tamanho do abrasivo corroborando com o aumento de densidade, largura e comprimento dos riscos.

6. Quanto aos micromecanismos, aparecem na forma de riscos.

Referente à comparação entre os ensaios:

7. Para o maior tamanho de abrasivo, o desgaste foi duas ordens de grandeza maior para o ensaio pino sobre lixa em relação ao roda-de-borracha.

8. Observa-se uma variação de uma ordem de grandeza no desgaste quando aumenta o tamanho do grão abrasivo para o ensaio pino sobre lixa, o mesmo não foi observado nos resultados do roda-de-borracha.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como prosseguimento dos estudos realizados neste trabalho, com base nos resultados apresentados, ainda existem aspectos que mereciam ser investigados, tais como:

1. Aplicar a mesma metodologia de ensaios em um ferro fundido com outras frações volumétricas de carbonetos.
2. Aumentar a quantidade de tamanhos de abrasivos investigados no ensaio roda-de-borracha, com tamanho de abrasivo menor que  $87\ \mu\text{m}$  e maior que  $170\ \mu\text{m}$  e observar o TCA encontrado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTIN, E., SINATORA, A. **Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill.** *Wear* 250, p. 492-501, 2001.

AMARAL, G. B. **Efeito da formulação no comportamento em abrasão de poliuretano.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p.41, 2010.

ASHBY, M.F.; LIM, S. C. **Wear-mechanism maps.** *Scripta Metallurgica et Materialia* 24, p. 805-810, 1990.

ASTM - American Standard for Testing Materials, **G-65 - Test Method Standard for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber wheel Apparatus.** Annual Book of Standards, Wear and erosion; Metal corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

BERNS, H. **Comparison of wear resistant MMC and white cast iron.** *Wear* 254, p.47-54, 2003.

CARVALHO, S.M. **Estudo microestrutural dos ferros fundidos branco alto cromo e molibdênio.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 70, 2005.

CHILDS, T.H.C., **The sliding wear mechanisms of metals, mainly steels.** *Tribology International*, p. 285-293, 1980.

CORONADO, J. J. SINATORA, A. **Load effect in abrasive wear Mechanism of cast iron with graphite and cementite.** *Wear* 267, p. 6–11, 2009a.

CORONADO, J. J. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais.** Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 150, 2010.

CORONADO, J. J.; SINATORA, A. **Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1.** *Wear* 271, p. 1794-1803, 2011a.

CORONADO, J. J.; SINATORA, A. **Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 2.** *Wear* 271, p. 1804-1812, 2011b.

DOGAN, O. N.; LAIRD II, G.; HAWK, J.A. **Solidification structure and abrasion resistance of high chromium white irons.** *Metallurgical and materials transactions* 28A, p. 1315-1328, 1997.

DUTRA, L. A. **Correlação de ensaios de desgaste abrasivo.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 50, 2010.

GATES, J. D. **Two-body and three-body abrasion: A critical discussion.** *Wear* 214, p.139-146, 1998.

HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. **An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear.** *Tribology International* 21, p. 51-57, 1988.

HUTCHINGS, I. M.; STEVENSON, A. N. J. **Development of the Dry Sand/Rubbers Wheel Abrasion Test.** *Wear* 195, p. 232-240,1996.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Ed. Edward Arnold, London, 1992.

JENSENA, L. D.; FUNDALB, E.; MOLLERC P.; JESPERSENA M. **Prediction of wear rates in comminution equipment.** *Wear* 269, p. 525-533, 2010.

JOST, H.P. **Tribology - origin and future.** *Wear*, p. 1-17, 1990.

LARSEN-BADSE, J. **Some effects of specimen size on abrasive wear.** *Wear* 19, p.27-35, 1972.

LIM, S. C. **Recent developments in wear-mechanism maps.** Nacional University of Singapore, Singapore, 1998.

LIM, S. C., **The relevance of wear-mechanism maps to mild-oxidational wear.** *Tribology International* 35, p. 717-723, 2002.

MARATRAY, F.; USSEGLIO-NANOT, R. **Facteur Affectant la Structure des Fontes Blanches au Chrome et au Molybdène**, 1ed Paris, France, Climax Molybdenum, p. 5-32, 1970.

MISRA, A.; FINNIE, I. **A classification three-body abrasive wear and design of a new tester**. Wear 60, p. 111-121, 1980.

MISRA, A.; FINNIE, I. **Some observations on two-body abrasive wear**. Wear 68, p. 41-56, 1981a.

MISRA, A.; FINNIE, I. **On the size effect in abrasive and erosive wear**. Wear 65, p. 359-373, 1981b.

NATHAN, G. W. JONES, J. D. **The empirical relationship between abrasive wear and applied conditions**. Wear 9, p.300–309, 1966.

OKOSHI, M.; SAKAI, H. **Researches on the mechanism of abrasion**. Report III, mechanism of abrasion of cast iron and steel. Trans. JSME, p. 29-47, 1941.

REGATTIERI, C. N. B. **Estudo da resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos alto cromo e molibidênio**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 98, 2006.

RIAHI, A. R.; ALPAS, A. T. **Wear map for grey cast iron**. Wear 255, p. 401-409, 2003.

SAE J444 Cast Shot and Grit Size Especifications, 2005.

SIN, H. SAKA, N. SUH, N. P. **Abrasive wear mechanism and the grit size effect**. Wear 55, p.163–190, 1979.

SLIFKA, A. J., MORGAN, T. J., CAMPOS, R. **Wear mechanism maps of 440C martensitic stainless steel**. Wear 162, p.614-618, 1993.

TABRETT, C. P.; SARE, I. R.; GHOMASHCHI, M. R. **Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys**. International Materials Reviews 41, p. 59-80, 1996.

VILLABÓN, L. R. **Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p.82, 2005.

VILLABÓN, L.; SINATORA, A. **Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços.** Mecânica Experimental, APAET 13, p. 1-11, 2006.

ZUM GAHR K. H. **Microstructure and wear of materials.** Elsevier, 1987.

ZUM GAHR K. H. **Abrasive Wear of white cast Irons.** Wear 64, p.175–194, 1980.

ZUM GAHR, Z. K. **Wear by hard particles.** Tribology International 31, p. 587-596, 1998.

WILLIAMS, J. A. **Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach.** Wear 225-229, p.1-17, 1999.

## **ANEXOS**

## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo A: Ensaio de desgaste abrasivo na roda-de-borracha

A Norma ASTM G-65 padroniza o ensaio de desgaste abrasivo utilizando o equipamento tipo roda-de-borracha.

Nessa dissertação foi usado o equipamento mostrado, esquematicamente, na figura 8.1 na configuração sugerida por HUNTCHINGS e STEVERSON (1996). Este possui algumas vantagens do descrito pela norma. Nessa configuração é possível medir a quantidade exata de abrasivo que passa pela amostra

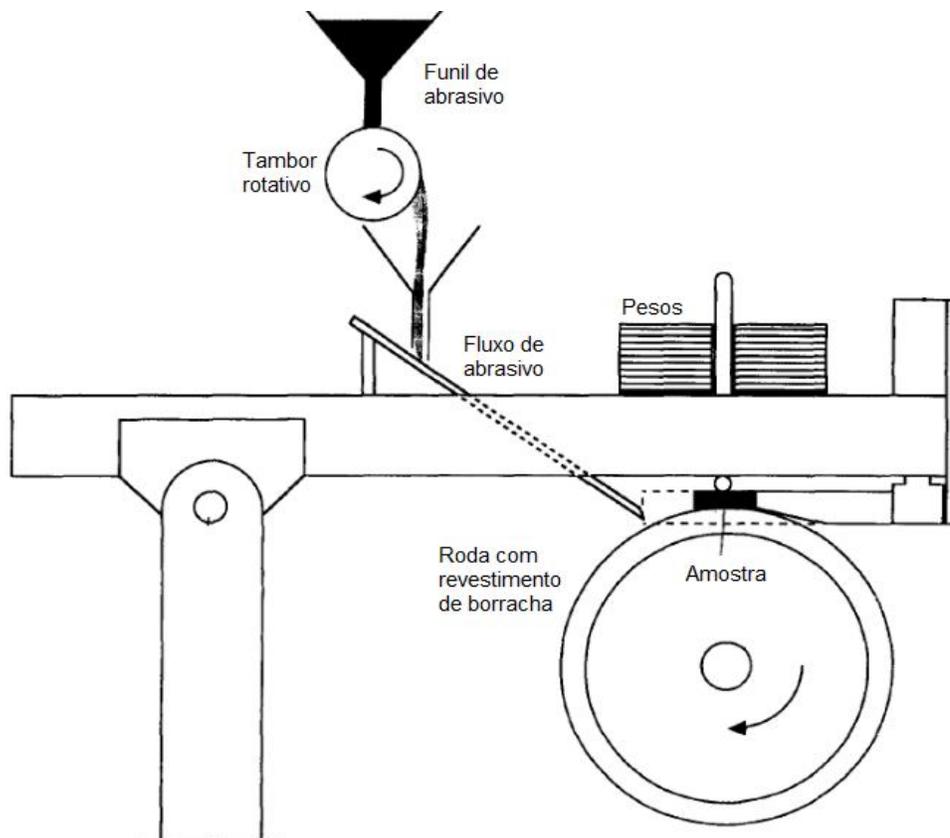


Figura 8-1 – Desenho, esquemático, do abrasômetro tipo roda-de-borracha desenvolvido por Hutchings e Steverson. Fonte: adaptado de HUTCHINGS e STEVERSON, 1996.

A configuração proposta por HUTCHINGS e STEVERSON (1996) faz uso dos parâmetros da Norma ASTM G-65. A norma estipula que a roda deva ter diâmetro de 203,2 mm e largura de 12,7 mm com uma roda de borracha envolvendo o aro da roda com espessura de 12,7 mm. A dureza da borracha deve estar entre 58 e 62 Shore A.

A carga normal é aplicada como um peso morto sobre a amostra e, é obtida como uma combinação das anilhas da tabela 8.1.

Tabela 8-1 - Peso das anilhas utilizadas para aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova.

<b>Número da Anilha:</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Peso (N)</b>
1	4,737	47,37
2	2,024	20,24
3	1,962	19,62
4	1,499	14,99
5	1,157	11,57
6	0,919	9,19
7	0,775	7,75
8	0,607	6,07
9	0,471	4,71
10	0,305	3,05
<b>Braço Articulado:</b>	<b>4,4</b>	<b>44</b>

Fonte: Adaptado de Amaral, G. B., p.41, 2010.

### **8.1.1. Procedimento recomendado pela norma ASTM G-65**

#### **Procedimento A**

Ensaio relativamente severo utilizado para materiais de média à elevada resistência à abrasão. Procedimento usado nesse trabalho.

A tabela 8.2 abaixo apresenta os valores de carga normal aplicada, rotações da roda e distância percorrida estipulados pela norma ASTM G-65.

Tabela 8-2 - Parâmetros de ensaio da norma ASTM G-65.

Procedimento Especificado:	Carga Aplicada ao Corpo-de-Prova (N):	Rotações do Disco (rpm):	Distância Percorrida (m):
A	130	6000	4309

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber

Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

## 8.2. Anexo B: Cálculo e apresentação dos resultados: ASTM G-65

Os resultados foram relatados obedecendo às recomendações da Norma ASTM G-65. A taxa de desgaste deve ser reportada como o volume perdido ( $\text{mm}^3$ ).

As tabelas contendo os valores obtidos com os ensaios e os valores calculados conforme a norma usando as equações descritas na seção 8.2.1 estão no anexo C.

### 8.2.1. Equações para o Volume Perdido

O volume perdido no desgaste foi obtido utilizando o valor da perda de massa medido experimentalmente e a equação abaixo:

$$\text{Volume Perdido} \left( \text{mm}^3 \right) = \frac{\text{Massa Perdida} \left( \text{g} \right)}{\text{Densidade} \left( \text{g/cm}^3 \right)} \times 1000 \quad 8.1$$

Devem ser feitas no mínimo três repetições para cada ensaio, sendo aceito um coeficiente de variação de até 7% para os resultados do procedimento A (ASTM G-65, 2001).

### 8.2.2. Equações estatísticas para o cálculo do coeficiente de variação

Para a verificação da repetibilidade dos resultados dos ensaios realizados, deve-se determinar o coeficiente de variação dos ensaios, para isso usam-se as seguintes equações da estatística:

Coeficiente de variação em porcentagem:

$$cv = \frac{s}{x} \times 100 \quad 8.2$$

Onde:

$\bar{x}$ : é a média aritmética dos resultados dos ensaios.

$s$ : é o desvio padrão dos resultados dos ensaios.

Desvio padrão calculado para qualquer quantidade de ensaios:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad 8.3$$

Onde:

$x_i$ : valor do resultado de cada medida  $i$ .

$\bar{x}$ : média aritmética dos resultados das medidas.

$n$ : número de ensaios.

### 8.3. Anexo C: Dados experimentais ensaio de desgaste roda-de-borracha

As Tabelas foram confeccionadas como sugerido pela Norma ASTM G-65 (2001). Essas tabelas apresentam para as três repetições realizadas no ensaio roda-de-borracha os valores da massa medida das amostras antes e depois do ensaio. E, também, o valor da densidade calculada para cada amostra, as dimensões e o volume perdido no desgaste calculado conforme a equação 8.1.

As tabelas 8.3, 8.4 e 8.5 apresentam os valores obtidos nos ensaios realizados com areia “fina” e carga aplicada de 44 N, 80 N e 130 N.

Tabela 8-3 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga normal de 44 N e areia “fina”.

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $90 \pm 10 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	16A	16B	17A
Carga do Ensaio	44 N	44 N	44 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	121,9933	122,7333	120,0716
Massa Inicial [g]	127,9205	127,8995	127,0913
Massa Final [g]	127,8995	127,8781	127,0719
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,48	7,48	7,43
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	2,8075	2,8609	2,611
Coefficiente de Variação [%]:	4,77%		
Umidade do ar [%]:	63%	59%	60%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-4 - Valores medidos de perda de massa em grama e valores calculados de volume perdido em mm<sup>3</sup>, no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de 80 N de carga normal e areia de granulometria "fina".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: 90 ± 10 µm

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: 60 ± 2 Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	17B	18A	18B
Carga do Ensaio	80 N	80 N	80 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	122,3767	122,3167	123,62
Massa Inicial [g]	127,0719	127,4702	127,4453
Massa Final [g]	127,0459	127,4453	127,4169
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,43	7,45	7,45
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	3,4993	3,3423	3,8121
Coefficiente de Variação [%]:	6,73%		
Umidade do ar [%]:	57%	55%	55%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-5 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação da carga de 130 N e areia "fina".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $90 \pm 10 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	19A	20A	20B
Carga do Ensaio	130 N	130 N	130 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	122,5233	122,0433	123,0667
Massa Inicial [g]	128,2363	127,1615	127,1072
Massa Final [g]	128,1811	127,1072	127,0511
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,5	7,43	7,43
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	7,36	7,3082	7,5505
Coefficiente de Variação [%]:	1,72%		
Umidade do ar [%]:	69%	65%	74%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

#### Comentários sobre as tabelas 8.3, 8.4 e 8.5:

1. Feitas 7 repetições para cada medida de massa das amostras com coeficiente de variação de  $10^{-6}$ .
2. Temperatura mantida constante a 25 °C.
3. Foi usada borracha nova a cada três ensaios sem variação considerável no diâmetro da roda.
4. Ensaios realizados de 18/07/2012 a 15/08/2012.

As tabelas 8.6, 8.7 e 8.8 correspondem aos ensaios executados com areia “média” e carga aplicada de 44 N, 80 N e 130 N.

Tabela 8-6 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga normal de 44 N e areia “média”.

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: 115 ± 15 µm

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: 60 ± 2 Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	14A	15A	15B
Carga do Ensaio	44 N	44 N	44 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	122,6667	122,6033	122,59
Massa Inicial [g]	127,9642	127,3697	127,3422
Massa Final [g]	127,9361	127,3422	127,3157
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,48	7,45	7,45
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	3,7567	3,6912	3,557
Coeficiente de Variação [%]:	2,77%		
Umidade do ar [%]:	66%	75%	71%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-7 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "média".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $115 \pm 15 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	10B	11A	11B
Carga do Ensaio	80 N	80 N	80 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	123,2233	121,27	123,3133
Massa Inicial [g]	127,256	126,6172	126,5788
Massa Final [g]	127,2169	126,5788	126,5379
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,44	7,4	7,4
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	5,2553	5,1892	5,527
Coefficiente de Variação [%]:	3,36%		
Umidade do ar [%]:	50%	56%	67%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-8 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "média".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: 115 ± 15 µm

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: 60 ± 2 Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	9A	9B	10A
Carga do Ensaio	130 N	130 N	130 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	123,8487	120,3433	122,25
Massa Inicial [g]	127,8106	127,7434	127,3179
Massa Final [g]	127,7434	127,6833	127,256
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47	7,47	7,44
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	8,9959	8,0455	8,3199
Coefficiente de Variação [%]:	5,78%		
Umidade do ar [%]:	60%	60%	57%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Comentários sobre as tabelas 8.6, 8.7 e 8.8:

1. Feitas 7 repetições para cada medida de massa das amostras com coeficiente de variação de 10<sup>-6</sup>.
2. Temperatura mantida constante a 25 °C.
3. Foi usada borracha nova a cada três ensaios sem variação considerável no diâmetro da roda.
4. Ensaio realizado de 19/06/2012 a 16/07/2012.

As tabelas 8.9, 8.10 e 8.11 apresentam os valores obtidos nos ensaios executados com areia “grossa” e carga aplicada de 44 N, 80 N e 130 N.

Tabela 8-9 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 44 N e areia “grossa”.

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $170 \pm 6 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	21 B	22 A	7B
Carga do Ensaio	44 N	44 N	44 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	122,2833	123,3466	122,3733
Massa Inicial [g]	126,9913	126,5836	126,7737
Massa Final [g]	126,9638	126,5541	126,7456
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x9	76x25x9	76x25x9
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,43	7,4	7,41
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	3,7012	3,9865	3,7922
Coeficiente de Variação [%]:	3,81%		
Umidade do ar [%]:	41%	59%	62%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-10 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 80 N e areia "grossa".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $170 \pm 6 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	5A	6A	8A
Carga do Ensaio	80 N	80 N	80 N
N° de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	123,48	122,4501	122,3733
Massa Inicial [g]	121,8482	125,6749	125,6686
Massa Final [g]	121,8047	125,6331	125,6283
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x8,5	76x25x8,8	76x25x8,8
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,54	7,52	7,52
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	5,7692	5,5585	5,359
Coefficiente de Variação [%]:	3,69%		
Umidade do ar [%]:	59%	62%	57%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Tabela 8-11 - Valores medidos de perda de massa e valores calculados de volume perdido no ensaio roda-de-borracha. Ensaio realizado com aplicação de carga de 130 N e areia "grossa".

Ensaio no Equipamento roda-de-borracha	
Norma ASTM G-65 Procedimento A	
Ensaio com areia seca	Quantidade de ensaios: 3
Abrasivo: Areia Normal Brasileira do IPT-SP	Granulometria: $170 \pm 6 \mu\text{m}$

Descrição do Material: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro do Disco: 228,5 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Espessura do Disco: 12,7 mm
Dureza do Corpo de Prova: $62,8 \pm 0,5$ HRC	Distância Percorrida: 4307,12 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão a Fio e Retífica	Dureza Borracha: $60 \pm 2$ Shore A
Duração do Ensaio: 30 min	Material da Borracha: Clorobutil

Nome do Ensaio	2A	2B	3A
Carga do Ensaio	130 N	130 N	130 N
Nº de Voltas da Roda	6000	6000	6000
Fluxo de Abrasivo [g/min]	123,6767	124,7067	123,5333
Massa Inicial [g]	109,0401	108,9389	118,9392
Massa Final [g]	108,9389	108,8374	118,8381
Dimensão da Amostra [mm]	76x25x7,6	76x25x7,6	76x25x8,3
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,55	7,55	7,54
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	13,4039	13,4437	13,4085
Coefficiente de Variação [%]:	0,16%		
Umidade do ar [%]:	68%	53%	65%

Fonte: adaptado de Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G-65, 2001, p.1-12.

Comentários sobre as tabelas 8.9, 8.10 e 8.11:

1. Feitas 7 repetições para cada medida de massa das amostras com coeficiente de variação de  $10^{-6}$ .
2. Temperatura mantida constante a 25 °C.
3. Foi usada borracha nova a cada três ensaios sem variação considerável no diâmetro da roda.
4. Ensaios realizados de 09/05/2012 a 01/06/2012.

#### 8.4. Anexo D: Dados experimentais ensaio de desgaste pino sobre lixa

Para cada condição do ensaio pino sobre lixa foram usados dois pinos e três repetições dos ensaios sobre o mesmo pino para atingir o regime de desgaste permanente.

O volume perdido foi calculado usando a equação 8.1 com um valor de densidade médio calculado para as amostras de 7,47 g/cm<sup>3</sup>. Valor da densidade próximo às densidades calculadas por ALBERTIN e SINATORA (2001) para o ferro fundido com diferentes composições químicas.

A tabela 8.12 apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados com a lixa de sílica de 220# e aplicação da carga de 5 N.

Tabela 8-12 - Valores medidos da massa e do volume perdido no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de sílica de 220#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Sílica (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 220 # (63 μm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	S2205N 9			S2205N 11		
Carga do Ensaio	5 N			5 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,2732	4,2727	4,2725	4,4346	4,4342	4,4340
Massa Final [g]	4,2727	4,2725	4,2723	4,4342	4,4340	4,4338
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,0669	0,0268	0,0268	0,0535	0,0268	0,0268

Comentários da tabela 8.12: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; trajetória do pino em espiral de Arquimedes garantindo abrasivo novo em todo o ensaio; utilizado um valor de densidade médio calculado; realizadas 7 repetições para cada medida de massa obtido um coeficiente de variação de  $10^{-6}$ ; temperatura mantida constante em 25 °C; ensaios realizados de 29/10/2012 e 30/10/2012 no LTM/UFU.

A tabela 8.13 apresenta as massas medidas antes e depois de cada ensaio, o volume perdido, a densidade e a distância percorrida no ensaio. Os ensaios foram realizados com a lixa de sílica de 220# sobre a aplicação da carga de 10 N.

Tabela 8-13 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de sílica de 220#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Sílica (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 220 # (63 µm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	S22010N 12			S22010N 13		
Carga do Ensaio	10 N			5 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,4500	4,4492	4,4486	4,2723	4,2715	4,2711
Massa Final [g]	4,4492	4,4486	4,4482	4,2715	4,2711	4,2707
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,1071	0,0803	0,0535	0,1071	0,0535	0,0535

Comentários da tabela 8.13: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; trajetória do pino em espiral de Arquimedes garantindo abrasivo novo em todo ensaio; utilizado um valor de densidade médio calculado; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 29/10/2012 e 30/10/2012 no LTM/UFU.

As tabelas 8.14 e 8.15 apresentam as massas medidas antes e depois de cada ensaio, o volume perdido calculado, a densidade e a distância percorrida no ensaio. Os resultados que estão na tabela são dos ensaios pino sobre lixa realizados com a lixa de sílica 80# e aplicação das cargas de 5 N e 10 N, respectivamente.

Tabela 8-14 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de sílica de 80#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Sílica (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 80 # (177 μm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	S805N 3			S805N 5		
Carga do Ensaio	5 N			5 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,3052	4,3038	4,3024	4,3949	4,3935	4,3922
Massa Final [g]	4,3038	4,3024	4,3009	4,3935	4,3922	4,3908
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,1874	0,1874	0,2008	0,1874	0,1740	0,1874

Comentários da tabela 8.14: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; trajetória do pino em espiral de Arquimedes garantindo abrasivo novo em todo ensaio; utilizado um valor de densidade médio calculado; temperatura mantida constante em 25 °C; ensaios realizados de 25/10/2012 e 26/10/2012 no LTM/UFU.

Tabela 8-15 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre Ixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de sílica de 80#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Sílica (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 80 # (177 µm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	S8010N 6			S8010N 7		
Carga do Ensaio	10 N			10 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,4024	4,3982	4,3937	4,3882	4,3838	4,3793
Massa Final [g]	4,3982	4,3937	4,3892	4,3838	4,3793	4,3747
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,5622	0,6024	0,6024	0,5890	0,6024	0,6158

Comentários da tabela 8.15: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; trajetória do pino em espiral de Arquimedes garantindo abrasivo novo em todo ensaio; utilizado um valor de densidade médio calculado; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 25/10/2012 e 26/10/2012 no LTM/UFU.

As tabelas 8.16 e 8.17 apresentam as massas medidas antes e depois de cada ensaio, o volume perdido calculado, a densidade e a distância percorrida no ensaio. Os resultados das tabelas são dos ensaios pino sobre lixa realizados com a lixa de granada 220# e aplicação das cargas de 5 N e 10 N, respectivamente.

Tabela 8-16 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de granada de 220#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Granada (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 220 # (63 µm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	G2205N 21			G2205N 23		
Carga do Ensaio	5 N			5 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,4675	4,4668	4,4665	4,4865	4,4858	4,4855
Massa Final [g]	4,4668	4,4665	4,4662	4,4858	4,4855	4,4851
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,0937	0,0402	0,0402	0,0937	0,0402	0,0535

Comentários sobre a tabela 8.16: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; utilizado um valor de densidade médio calculado; trajetória do pino em espiral de Arquimedes; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 31/10/2012 e 01/11/2012 no LTM/UFU.

Tabela 8-17 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de granada de 220#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Granada (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 220 # (63 µm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	G22010N 24			G22010N 26		
	10 N					
Carga do Ensaio	10 N					
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47					
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,2826	4,2821	4,2815	4,3203	4,3197	4,3192
Massa Final [g]	4,2821	4,2815	4,2810	4,3197	4,3192	4,3187
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,0669	0,0803	0,0669	0,0803	0,0669	0,0669

Comentários sobre a tabela 8.17: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; utilizado um valor de densidade médio calculado; trajetória do pino em espiral de Arquimedes; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 31/10/2012 e 01/11/2012 no LTM/UFU.

As tabelas 8.18 e 8.19 apresentam as massas medidas antes e depois de cada ensaio, o volume perdido calculado, a densidade das amostras e a distância percorrida no ensaio. Os resultados das tabelas são dos ensaios pino sobre lixa realizados com a lixa de granada 100#, e aplicação das cargas de 5 N e 10 N, respectivamente.

Tabela 8-18 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre ixa. Ensaio realizado com carga normal de 5 N e lixa de granada de 100#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Granada (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 100 # (149 µm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	G1005N 15			G1005N 17		
Carga do Ensaio	5 N			5 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,3187	4,3177	4,3167	4,3176	4,3167	4,3155
Massa Final [g]	4,3177	4,3167	4,3156	4,3167	4,3155	4,3143
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,1339	0,1339	0,1473	0,1205	0,1606	0,1606

Comentários da tabela 8.18: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; trajetória do pino em espiral de Arquimedes; utilizado um valor de densidade médio calculado; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 27/10/2012 e 28/10/2012 no LTM/UFU.

Tabela 8-19 - Valores medidos da massa e do volume perdido, no ensaio pino sobre lixa. Ensaio realizado com carga normal de 10 N e lixa de granada de 100#.

Ensaio no Equipamento Pino contra Lixa	
Ensaio com lixa	Quantidade de ensaios: 2
Abrasivo: Granada (SiO <sub>2</sub> )	Granulometria Abrasivo: 100 # (149 μm)
Material em desgaste: Ferro Fundido Branco 2,9 % C e 19 % Cr	Diâmetro inicial do Disco: 210 mm
Tratamento Térmico: Têmpera (975 °C) e Revenido (200 °C)	Diâmetro final do Disco: 27 mm
Dureza do Corpo de Prova: 62,8 ± 0,5 HRC	Distância Percorrida (aproximada): 6,2 m
Preparação da Superfície: Corte Eletroerosão e Retífica	Volume da amostra: 565,49 mm <sup>3</sup>
Rotação do Disco: 35 rpm	Dimensão da Amostra: 6x20 mm
Rotação da Amostra: 25 rpm	Duração do Ensaio: 10 s

Nome do Ensaio	G10010N 19			G10010N 20		
Carga do Ensaio	10 N			10 N		
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	7,47			7,47		
Repetição do ensaio (nessa ordem)	1	2	3	1	2	3
Massa Inicial [g]	4,4080	4,4055	4,4029	4,3169	4,3148	4,3123
Massa Final [g]	4,4055	4,4029	4,4006	4,3148	4,3123	4,3099
Volume Perdido [mm <sup>3</sup> ] (massa perdida/densidade) x 1000	0,3347	0,3481	0,3079	0,2811	0,3347	0,3213

Comentários da tabela 8.19: Foram realizados 3 ensaios seguidos com a mesma amostra; utilizado um valor de densidade médio calculado; trajetória do pino em espiral de Arquimedes; temperatura mantida constante a 25 °C; ensaios realizados de 27/10/2012 e 28/10/2012 no LTM/UFU.

### 8.5. Anexo E: Cálculo das taxas de desgaste parametrizadas

A equação 8.4 foi utilizada para o cálculo das taxas de desgaste parametrizadas utilizadas para a construção do mapa de desgaste abrasivo da figura 4.26.

$$\text{Taxa de desgaste } \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}} \right) = \frac{\text{Volume perdido no desgaste } (\text{mm}^3)}{\text{Distância percorrida no ensaio } (\text{m}) \times W(\text{N})} \quad 8.4$$

Onde:

W: é a força normal aplicada na amostra (N).

Para o ensaio no roda-de-borracha a distância percorrida em cada ensaio foi de 4307 m, e para o ensaio no pino sobre lixa foi de 6,2 m.