



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESGASTE ABRASIVO DO AÇO HADFIELD COM DIFERENTES  
TEORES DE CARBONO EM ABRASÔMETRO DO TIPO PINO-DISCO**

**MARCELO DOS ANJOS OLIVEIRA**

**RECIFE 6 PE  
JULHO/2016**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESGASTE ABRASIVO DO AÇO HADFIELD COM DIFERENTES  
TEORES DE CARBONO EM ABRASÔMETRO DO TIPO PINO-DISCO**

**MARCELO DOS ANJOS OLIVEIRA**

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

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica ó Materiais e Fabricação.

Orientador: Dr. Flávio José da Silva

Co-Orientador: Dr. Kleber Gonçalves Bezerra  
Alves

RECIFE ó PE  
JULHO/2016

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- O48d Oliveira, Marcelo dos Anjos.  
Desgaste abrasivo do aço hadfield com diferentes teores de carbono em abrasômetro do tipo pino-disco / Marcelo dos Anjos Oliveira - 2016.  
127folhas, Il.; e Tab.; Abr.
- Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.  
Coorientador: Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves.
- Dissertação (Mestrado) ó Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.  
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Mecânica. 2. Abrasômetro. 3. Aço Hadfield. 4. Desgaste abrasivo. 5. Shutdown. 6. Encruamento de superfície. I. Silva, Flávio José da. (Orientador). II. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra(Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 621 CDD (22. ed.) BCTG/2016-287

31 de agosto de 2016.

DESGASTE ABRASIVO DO AÇO HADFIELD COM DIFERENTES TEORES DE  
CARBONO EM ABRASÔMETRO DO TIPO PINO-DISCO

MARCELO DOS ANJOS OLIVEIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. KLEBER GONÇALVES BEZERRA ALVES  
COORIENTADOR

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> RITA DE CÁSSIA FERNANDES DE LIMA  
VICE-COORDENADORA DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA (UFPE)

---

Prof. Dr. KLEBER GONÇALVES BEZERRA ALVES (UFPE)

---

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> MAGDA ROSÂNGELA SANTOS VIEIRA (UFPE)

## AGRADECIMENTOS

Se você está lendo esta página é porque eu consegui. E não foi fácil chegar até aqui. Do processo seletivo, passando pela aprovação até a conclusão do Mestrado, foi um longo caminho percorrido, longe da família, longe dos amigos. Nada foi fácil, nem tampouco tranquilo, mas, o êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho (Abraham Lincoln).

Em cada frase escrita lembro, no momento, das pessoas que passaram em minha vida e que fizeram desse projeto uma realidade dos planos de minha vida. Concluí e agradeço a cada um de vocês que contribuíram.

Aos meus pais, por terem mostrado o caminho para que eu possa ser mais humano, ensinaram-me sobre valores e, principalmente, pelos momentos em que vocês precisaram ser duros, vocês fizeram isso com amor e respeito. Vocês nunca usaram de autoridade comigo para me ensinar nada pela dor, vocês sempre usaram as vias do amor. Obrigado! Amo vocês! Ao meu pai, Heloísio, que nunca deixou de me amar, nem de confiar em mim. Pai, meu amor eterno. À minha mãe, Acácia, amor incondicional. Mãe, você que me gerou e me alfabetizou, ensinando-me a ler. A vocês que por muitas vezes renunciaram aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu;

A minha irmã Vanessa Oliveira e seu esposo José Eusébio e, claro, aos meus sobrinhos Cauã e Cauane (como sentia falta de vocês). Amor incondicional, sempre. A distância não nos separa. Seus corações estão comigo e o meu com vocês;

A todos os meus familiares, primos, tios, e amigos. Não vou citar nomes, para não esquecer de ninguém. Mas há aquelas pessoas especiais que diretamente me incentivaram;

À Mônica Modesto, uma pessoa incrível, que me inspirou, que passou noites me auxiliando, que disse que eu seria capaz quando eu mesmo duvidei da minha capacidade, a pessoa que acreditou em mim. Obrigado, Moninha, não existem palavras para expor a minha gratidão por tudo que fez por mim, você me fez acreditar em mim novamente. Como diz Vinícius de Moraes: "Você tem que vir comigo, em meu caminho, porém o caminho não será triste se depender de mim, pode ser difícil, mas não triste". Obrigado por tudo, Moninha, essa conquista é a primeira de muitas que vamos comemorar juntos;

Ao Couchsurfing e diversos amigos que aí pude compactuar meus dias: Ivan Draco, Pedro Gamboa, Rhuan Lima (nossa viagem ao Chile hein?!kkk), Edelson Moraes, obrigado, galera. Qual será o próximo meeting?rsrs;

À amizade de: Leonia Torres e Tamires Costa, obrigado por tudo, pelo apoio, pela amizade, por acreditarem em mim e por estarem sempre presentes nos momentos que eu mais precisei de vocês. Como diz, William Shakespeare "Longas amizades continuam a crescer, mesmo a longas distancias";

Ao Prof. Dr. Flávio José, meu orientador, amigo e exemplo profissional, por não ter permitido que eu interrompesse o processo e pela confiança e espero que ainda nos

encontremos muito por essa nossa jornada. Obrigado, professor, e que venham os novos desafios. Obrigado também ao professor Kleber Gonçalves por ter-me co-orientado;

Aos professores, funcionários e colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Obrigado, técnicos: Janaina Cirino, Ivaldo Dantas e Rubens Andrade, que muito me auxiliaram no projeto, sempre com sorrisos no rosto e uma atenção extraordinária. Obrigado, amigos da pós: Jarmison Araújo, Genilson, Suseanne Kedma, Fábio Rodrigues e Adriel Lima. Foi extremamente importante a companhia de vocês durante esses dois anos, a comutação de conhecimentos e a amizade foram fundamentais para a minha adaptação em Recife;

Ao professor Severino Urtiga, por disponibilizar um espaço físico para o início do projeto;

Aos professores Anibal Siqueira e Carlos Augusto, que aceitaram compor a banca do seminário. À professora Magda Rosângela e Cezar Gonzalez por comporem a banca de defesa, pelas sugestões e análises significativas às quais tentei atender nesta versão definitiva do texto;

A todos os integrantes da Equipe Mangue BAJA que me ajudaram muito. Obrigado, galera! Continuem com esse trabalho magnífico, com foco, dedicação, que vocês trilharão bons caminhos;

Ao PRH PB203 ó Equipamentos pelo apoio financeiro;

À FACEPE, CAPES, CNPQ pelo apoio financeiro;

Ao professor Amilton Sinatora pelo apoio a realização do trabalho, por disponibilizar recursos materiais, apoio técnico, respeito e comprometimento. Obrigado!;

Ao corpo técnico do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), em especial: Raquel Camponucci e Marcos Ara pelo apoio técnico e realização de ensaios na USP;

Quero agradecer a todos aqueles que sempre confiaram em mim, desde sempre.

À minha família e aos meus verdadeiros amigos, sempre. Sempre mesmo.

Com vocês, queridos, divido a alegria desta experiência.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. Charles Chaplin.

## RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo, investigar o efeito do teor de carbono e do tamanho do abrasivo na resistência ao desgaste e no fenômeno de encruamento superficial de quatro aços Hadfield. Para esse estudo, foi montado, o equipamento pino contra disco, e, como abrasivo utilizou-se lixas de ferro, com o tamanho médio entre 36  $\mu\text{m}$  e 93  $\mu\text{m}$ . Para o alcance do objetivo proposto foram delimitados materiais e métodos, a saber: (a) montagem do abrasômetro pino-disco a partir de um dispositivo desativado disponibilizado pelo LFS-USP; (b) confrontar resultados experimentais ó dois materiais (Aço 1045 e alumínio 6351) foram submetidos a ensaios realizados na UFPE e USP para fins de estudos comparativos; (c) avaliação da influência de parâmetros do ensaio ó três abrasivos com diferentes tamanhos de partículas e diferentes cargas foram submetidos e avaliados mediante o desgaste abrasivo; (d) avaliação do comportamento de diferentes composições do aço Hadfield perante ensaios de abrasividade ó aços contendo quatro diferentes teores de carbono foram submetidos a ensaios com lixas #220 e #320; (e) análise das superfícies desgastadas ó após os ensaios dos materiais, as superfícies foram realizadas análises por microscópio eletrônico de varredura (MEV) das superfícies desgastadas. Os resultados obtidos com o equipamento na metodologia empregada tiveram uma boa reprodutibilidade. Foram observadas diferenças nos resultados entre os equipamentos da UFPE e da USP. Quanto a este tópico, o desgaste abrasivo do aço Hadfield foi influenciado pelo teor de carbono apresentando uma relação em que maiores teores demonstraram menor efeito de desgaste, diferentes tamanhos de abrasivo ocasionam um efeito de encruamento significativo, onde se observou o ganho de dureza em aços com menores teores de carbono. Contudo, foi apresentada uma oscilação do efeito no abrasivo #320. As micrografias revelaram microsulcos e microcortes provenientes do ensaio e não foram observadas diferenças nas marcas de desgaste quando utilizados tamanhos diferentes de partícula abrasiva. Ao final, chegou-se a conclusão de que os resultados obtidos demonstram que o teor de carbono influência na resistência ao desgaste do aço e consequentemente no encruamento superficial do aço. Observa-se também a influência do tamanho do abrasivo e carga aplicada o ensaio.

**Palavras-chave:** Abrasômetro. Aço Hadfield. Desgaste abrasivo. Encruamento de superfície.

## ABSTRACT

This research aimed to investigate the effect of the carbon content and the size of the abrasive in the wear resistance and surface hardening phenomenon four Hadfield steel. For this study, has been assembled, the disc against pin device and abrasive was used iron sandpapers, with average size between 36 m and 93 micrometers. To achieve the proposed objectives were defined materials and methods, namely: (a) mounting the pin-disk abrasômetro from a disabled device provided by the LFS-USP; (b) comparing experimental results - two materials (1045 steel and aluminum 6351) were submitted to tests performed at university and USP for purposes of comparative studies; (c) evaluation of the influence of the test parameters - Three abrasive particles with different sizes and different loads were submitted and evaluated by the abrasive wear; (d) assessment of the behavior of different steel compositions Hadfield before abrasiveness tests - steels containing four different carbon contents were subjected to tests with sandpaper # 220 and # 320; (e) analysis of the worn surfaces - after the tests of materials different analyzes were performed by scanning electron microscope (SEM) of worn surfaces. The results obtained with the equipment in the methodology employed had good reproducibility. There were differences in results between the equipment and the UFPE USP. On this topic, the abrasive wear Hadfield steel was influenced by carbon having a relationship in which higher levels showed less wear effect, different abrasive sizes cause a significant strain hardening effect, which was observed gain hardness steel with lower carbon content. However, an oscillation of the abrasive effect on the # 320 was presented. The micrographs revealed microsulcos and microcuts from test and differences were observed in wear marks when using different sizes of abrasive particle. In the end, came to the conclusion that the results show that the influence of carbon content in the wear resistance of steel and consequently the surface of the steel hardening. It is also observed the influence of abrasive size and load applied to the test.

**Key words:** Abrasion Resistance Machine. Mangalloy. Abrasive wear. Surface work hardening.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema dos fenômenos estudados na tribologia-----	6
Figura 2.2. Esquema do sistema tribológico-----	8
Figura 2.3. Gráfico do desgaste ao longo da vida útil de um componente-----	11
Figura 2.4. Fluxograma das classificações do mecanismo de desgaste abordadas na literatura-----	11
Figura 2.5. Mecanismos de desgaste segundo DIN 50320-----	12
Figura 2.6. Diagrama do tipo de desgaste encontrado na indústria -----	14
Figura 2.7. Diferentes micromecanismos de desgaste propostos-----	15
Figura 2.8. Tipos de contato abrasivo-----	16
Figura 2.9. Micrografias das superfícies desgastadas para o aço ferramenta-----	17
Figura 2.10. Parâmetros do sistema tribológico que influenciam o desgaste abrasivo--	18
Figura 2.11. Variação da taxa de desgaste em função da carga aplicada-----	19
Figura 2.12. Representação gráfica da perda de massa em função da carga aplicada--	20
Figura 2.13. Variação da taxa de desgaste do aço AISI 1020 em função da força aplicada-----	21
Figura 2.14. Três condições da taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo---	22
Figura 2.15. Curvas que exibem o comportamento no desgaste para diversos metais---	23
Figura 2.16. Gráfico perda de massa no ensaio de desgaste para duas matrizes diferentes de um ferro fundido-----	27
Figura 2.17. Comparação entre a perda de massa média do aço H-13 e do aço Hadfield - -----	28
Figura 2.18. Gráfico apresentando a perda de massa em função do tamanho do abrasivo para materiais com estruturas cristalinas diferentes, CFC (Al) e CCC (aço 1045)-----	29
Figura 2.19. Gráfico que relaciona o número de Mohs com a dureza Vickers-----	30
Figura 3.20. Relação que define os regimes de severidade-----	30
Figura 2.21. Influência da dureza na resistência ao desgaste abrasivo de diversos metais puros, submetidos à abrasão do tipo dois corpos-----	31
Figura 2.21. Atributos relacionados ao desgaste importantes para a simulação-----	34
Figura 2.23. Esquema do abrasômetro Roda de Borracha á seco-----	36
Figura 2.24. Esquema do abrasômetro Roda de Borracha em condição úmido-----	37
Figura 2.25. Ilustração e imagens do sistema pino-disco-----	38

Figura 2.26. Protótipo virtual do equipamento utilizando solid Edge-----	39
Figura 2.27. Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo-----	39
Figura 2.28. Esquema ilustrativo do ensaio de desgaste de quatro esferas-----	40
Figura 2.29. Esquema ilustrativo do ensaio de análise de desgaste do tipo bloco-disco (ASTM G77)-----	41
Figura 2.30. Esquema ilustrativo dos diversos testes para desgaste-----	41
Figura 2.31. Tabela apresentando as classes do aço Hadfield-----	42
Figura 2.32. Diagrama de fases do aço Hadfield em 13%-----	43
Figura 2.33. Diagrama TTT temperatura-tempo-transformação do aço manganês, 13%Mn-----	44
Figura 3.1. Dispositivo para estudo de desgaste do tipo pino no disco e seus componentes-----	49
Figura 3.2. Cargas confeccionadas em aço inox AISI 304-----	49
Figura 3.3. Mancal de fixação do pino-----	50
Figura 3.4. Mandril de fixação dos corpos de prova-----	50
Figura 3.5. Dispositivos do controle de comandos do equipamento-----	51
Figura 3.6. Ilustração dos corpos de prova utilizados no ensaio-----	52
Figura 3.7. Ilustração do contato pino-disco e o dispositivo montado na UFPE-----	53
Figura 3.8. Software desenvolvido na UFPE para o abrasômetro pino-disco-----	54
Figura 3.9. Esquematização das etapas de configuração do dispositivo-----	55
Figura 3.10. Etapas do procedimento experimental-----	56
Figura 3.11. Descrição do processo experimental-----	57
Figura 3.12. Esquematização da metodologia do projeto-----	60
Figura 4.1. Gráfico da evolução da perda de massa média com o tempo-----	62
Figura 4.2. Gráficos comparativos da perda de massa no ensaio de desgaste-----	65
Figura 4.3. Gráficos de perda de massa em função do tempo para diferentes lotes de lixa-----	68
Figura 4.4. Perda de massa dos materiais em função da variação da carga aplicada---	71
Figura 4.5. Perda de massa do aço SAE1045 e Al 6351-T6 em função da variação da carga aplicada-----	73
Figura 4.6. Gráfico comparando taxas de desgaste em relação ao tamanho do abrasivo---	76

Figura 4.7. Curvas de desgaste variando a granulometria do abrasivo-----	77
Figura 4.8. Comparativo do efeito do tamanho granulométrico do abrasivo no ensaio----- -----	78
Figura 4.9. Comportamento empírico do ensaio em relação ao experimental-----	80
Figura 4.10. Micrografia dos aços Hadfield com diferentes composições-----	81
Figura 4.11. Micrografia e espectro obtido por EDS do aço VL 01-----	84
Figura 4.12. Perda de massa acumulativa para diferentes tamanhos de abrasivos-----	86
Figura 4.13. Efeito de diferentes abrasivos na perda de massa dos aços Hadfield----ô	88
Figura 4.14. Relação entre durezas antes e pós-ensaios com abrasivos (# 320 e #220)-	89
Figura 4.15. Relação entre taxa de desgaste e aumento de dureza por encruamento----	91
Figura 4.16. Taxa de desgaste em diferentes composições do aço Hadfield-----	93
Figura 4.17. Comparação entre aços Hadfield, realizados na UFPE e na USP-----	96
Figura 4.18. Micrografias das superfícies desgastadas, Al e VL 01-----	98
Figura 4.19. Micrografias do alumínio em diferentes abrasivos.-----	99
Figura 4.20. Micrografias das diferentes composições do aço Hadfield-----	101
Figura 4.21. Imagem da micrografia do aço VL 01-----	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 ó Materiais utilizados para a validação do dispositivo-----	51
Tabela 3.2 ó Aço Hadfield com diferentes teores de carbono-----	52
Tabela 4.1 ó Perda acumulada média de massa obtida nos ensaios-----	62
Tabela 4.2 ó Perda média de massa para os materiais-----	63
Tabela 4.3 ó Taxa média de desgaste por ensaio-----	64
Tabela 4.4 ó Variação experimental entre instituições da taxa de desgaste abrasivo---	67
Tabela 4.5 ó Perda de massa variando o lote do abrasivo-----	69
Tabela 4.6 ó Perda de massa em função da carga aplicada-----	70
Tabela 4.7 ó Relação de perda de massa em função da carga aplicada-----	72
Tabela 4.8 ó Perda de massa dos materiais submetidos à carga incrementar-----	73
Tabela 4.9 ó Perda de massa na ação das diferentes granulometrias do abrasivo-----	75
Tabela 4.10 ó Taxa de desgaste em diferentes granulometrias-----	76
Tabela 4.11 ó Valores experimentais x empíricos-----	79
Tabela 4.12 ó Composição química dos aços Hadfield-----	83
Tabela 4.13 ó Média da microdureza para diferentes composições de aço Hadfield----	85
Tabela 4.14 ó Variação (%) do efeito de diferentes abrasivos no aço-----	87
Tabela 4.15 ó Dureza dos aços Hadfield antes e após ensaios com diferentes abrasivos-- -----	88
Tabela 4.16 ó Aumento de dureza em função do tamanho do abrasivo-----	90
Tabela 4.17 ó Perda de massa e taxa de desgaste variando o teor de carbono do aço---	92
Tabela 4.18 ó Composição de diferentes aços Hadfield e a taxa de desgaste-----	93
Tabela 4.19 ó Perda de massa no ensaio para instituições-----	97

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AISI - Sistema americano para a classificação dos aços.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CP ó Corpo de prova.

LFS: Laboratório de Fenômenos de Superfície.

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura.

PM ó Perda de massa média.

RA: Austenita retida.

SAE ó Sociedade de engenharia automotiva.

TCA ó Tamanho crítico do abrasivo.

TX ó Taxa de desgaste

UFPE ó Universidade Federal de Pernambuco.

USP ó Universidade de São Paulo.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>01</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>1.1. OBJETIVOS</b>	<b>04</b>
1.1.1. Objetivo geral	04
1.1.2. Objetivos específicos	04
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>05</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>05</b>
<b>2.1. TRIBOLOGIA</b>	<b>05</b>
2.1.1. Histórico	05
2.1.2. Definição	06
2.1.3. Tribossistema	07
<b>2.2. DESGASTE</b>	<b>08</b>
2.2.1. Modelos de desgaste	09
2.2.2. Etapas de desgaste	10
2.2.3. Classificação e mecanismos de desgaste	11
<b>2.3. DESGASTE ABRASIVO</b>	<b>13</b>
2.3.1. Definições	13
2.3.2. Parâmetros que influenciam o desgaste abrasivo	17
2.3.2.1. O efeito da carga no desgaste	18
2.3.2.2. O tamanho da partícula abrasiva	21
2.3.2.3. A microestrutura	25
2.3.3. Dureza e desgaste abrasivo	29

<b>2.4. TRIBÔMETROS</b>	<b>33</b>
2.4.1. Ensaios de desgaste	35
2.4.1.1. Abrasômetro Roda de Borracha condição à seco	35
2.4.1.2. Abrasômetro Roda de Borracha condição úmida	36
2.4.1.3. Pino-disco	37
2.4.1.4. Outros dispositivos	40
<b>2.5. O AÇO HADFIELD</b>	<b>42</b>
2.5.1. O aço e suas particularidades	42
2.5.2. A influência dos elementos constituintes	45
2.5.2.1. Carbono	45
2.5.2.2. Manganês	46
2.5.2.3. Influência de outros elementos de liga	46
2.5.3. Desgaste abrasivo no aço Hadfield	47
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>48</b>
<b>3. MATERIAIS E METÓDOS</b>	<b>48</b>
<b>3.1. MONTAGEM DO DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO</b>	<b>48</b>
<b>3.2. ENSAIOS PARA COMPARAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS</b>	<b>51</b>
3.2.1. Materiais	51
3.2.2. Corpos de Prova	52
3.2.3. Abrasivos	53
<b>3.3. O ENSAIO</b>	<b>53</b>
3.3.1. Princípio físico do ensaio	53
3.3.2. Descrição do ensaio	54

3.3.3. Avaliação dos parâmetros do ensaio -----	57
<b>3.4. ESTUDO DAS PROPRIEDADES NO ENSAIO PARA O AÇO HADFIELD -</b> -----	<b>58</b>
3.4.1. Ensaio de desgaste no aço Hadfield-----	58
3.4.2. Caracterizações microestruturais -----	58
3.4.2.1. Microdureza Vickers (HV) -----	58
3.4.2.2. Análises microestrutural -----	58
3.4.2.3. Análise da superfície desgastada -----	59
<b>3.5. FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DO ESTUDO -----</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO IV-----</b>	<b>61</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----</b>	<b>61</b>
<b>4.1. ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO-----</b>	<b>61</b>
4.1.1. Perda de massa -----	61
4.1.2. Taxa de desgaste -----	64
4.1.3. Erro médio experimental obtido -----	65
<b>4.2. COMPARAÇÃO DE ENSAIOS (USP X UFPE) -----</b>	<b>65</b>
4.2.1. Comparação entre diferentes laboratórios -----	65
<b>4.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO ENSAIO -----</b>	<b>69</b>
4.3.1. Efeito da carga no ensaio -----	69
4.3.2. Efeito do tamanho das partículas do abrasivo -----	75
4.3.2.1. O efeito das lixas abrasivas no ensaio pino-disco -----	75
4.3.2.2. Análise experimental x teórico -----	79
<b>4.4. ESTUDO DO AÇO HADFIELD -----</b>	<b>81</b>
4.4.1. Análise da microestrutura -----	81
4.4.2. Identificação de composição química -----	83



4.4.3. Ensaio de microdureza -----	85
4.4.4. Efeito do tamanho do grão nos ensaios de desgaste no Hadfield -----	86
4.4.4.1. Na resistência ao desgaste -----	86
4.4.4.2. No encruamento -----	88
4.4.5. Influência de teor de carbono -----	92
4.5.4.1. No ensaio de desgaste -----	92
4.4.5.2 - No mecanismo de encruamento do aço -----	95
4.4.6. Relação entre tamanho de grão e o efeito de desgaste no ensaio-----	95
4.4.7. Discussão acerca dos resultados obtidos pela USP -----	96
<b>4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR ANÁLISE DE MICROGRAFIAS -----</b>	<b>97</b>
4.5.1. Superfície de desgaste entre diferentes materiais -----	97
4.5.2. Superfície de desgaste entre diferentes lixas e mesmo material -----	99
4.5.3. Superfície de desgaste variando a composição do aço Hadfield -----	101
<b>5. CAPÍTULO V -----</b>	<b>104</b>
<b>5. CONCLUSÃO -----</b>	<b>104</b>
<b>5.1. CONCLUSÃO DO OBJETIVO GERAL -----</b>	<b>104</b>
<b>5.2. CONCLUSÃO SOBRE OS OBJETIVOS ESPECÍFICOS -----</b>	<b>104</b>
<b>5.3. TRABALHOS FUTUROS -----</b>	<b>105</b>
<b>5. CAPÍTULO VI -----</b>	<b>107</b>
<b>7. REFERÊNCIAS -----</b>	<b>107</b>

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

O aço Hadfield foi inventado por Robert Hadfield, em 1882. Destacam-se em sua composição química, o carbono e o manganês. Apresenta ainda baixos teores de outros elementos em sua composição, tais como: silício, cromo, titânio, etc. O aço exhibe a estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), baixa resistência, alta ductilidade e microestrutura que consiste de austenita metaestável e apresenta a excepcional habilidade de encruar. De acordo Rocha (2009), sua dureza após o encruamento chega a apresentar ganhos de até 100% em relação à dureza inicial (240HB ó 500HB).

Devido a suas características mecânicas, o aço Hadfield é empregado em setores como: pedreiras, terraplenagem, minas, siderurgia, perfuração de petróleo, equipamentos de processamento e manuseio de materiais como dentes de escavadoras, britadores, moinhos de trituração, martelos de fragmentação, entre outros. Fato que é justificado pela combinação de alta tenacidade e ductilidade com alta capacidade de endurecimento em trabalho, conseqüentemente, boa resistência ao desgaste.

O desgaste é um mecanismo que desperta um grande interesse industrial, principalmente, devido aos prejuízos causados. O impacto gerado pelo fenômeno é tão significativo que, em 2005, Sinatora apresentou em seu trabalho, estimativas de prejuízos referentes ao desgaste em diversos países e descreveu que na Alemanha, por exemplo, estimava-se cerca de 35 bilhões de euros por ano.

O mecanismo de desgaste é gerado a partir de pelo menos duas superfícies em contato, em movimento relativo, sob ação de uma força, em que a superfície de menor dureza superficial será afetada, podendo ser classificado como: desgaste abrasivo, por fadiga, erosivo e corrosivo. De acordo Eyre (1966), referente às perdas industriais mundiais relacionadas a desgaste, 50% são geradas pelo mecanismo abrasivo.

Nesse contexto, é imprescindível mencionar a simulação do mecanismo de desgaste realizada em centros de desenvolvimento e pesquisa, fato este constatado no acervo literário com trabalhos relacionados em montagem de equipamentos para testes laboratoriais para a análise de desgaste, em destaque, o desgaste abrasivo. Entre as instituições que se destacam nesse aspecto, têm-se a Universidade de São Paulo, com o laboratório de fenômenos de superfícies (LFS) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com o laboratório de tecnologia em atrito e desgaste (LTAD).

O desgaste abrasivo pode ser simulado utilizando-se diversos dispositivos montados e/ou adaptados. Entre os métodos utilizados no ensaio de desgaste abrasivo, destaca-se o emprego do dispositivo pino-disco, o qual consiste em um sistema composto por um pino sob a ação de uma força que é pressionado contra a superfície de um disco em movimento circular, gerando no movimento uma trajetória de perda gradativa de massa do pino. Diversas condições podem ser modificadas, simulando inúmeras situações. No ensaio, é possível modificar condições como: carga aplicada, velocidade, tipo de abrasivo, presença de lubrificação e o movimento dos corpos em contato (pino e disco).

Alguns trabalhos disponíveis na literatura apresentam estudos que exibem ensaios utilizando o dispositivo pino-disco para avaliação de desgaste do aço Hadfield, verificando a influência dos constituintes de sua composição, assim como investigam a influência de fatores externos: carga, tipo de abrasivo, etc. Autores como: Jost e Schmidt (1986), Zum-Gahr (1987), Abbasi et al. (2010), Atabaki et al. (2012) e outros, abordam em seus trabalhos discussões sobre o tema que serão abordados e discutidos ao longo do trabalho.

Esse trabalho tem como objetivo auxiliar à retomada de pesquisas na área tribológica do Departamento de Engenharia Mecânica (DECEM-UFPE), através da montagem de um dispositivo para ensaios de desgaste abrasivo do tipo pino-disco e, posteriormente, avaliar o comportamento do aço Hadfield com diferentes teores de constituintes, para assim, confrontar com resultados obtidos sob mesmas condições em outro centro de pesquisa, contribuindo, dessa forma, para o meio técnico/científico. Este estudo permitirá agregar aos conhecimentos já descobertos até o presente novos elementos que auxiliarão esclarecimentos sobre a influência da composição química do aço Hadfield no encruamento produzido durante um ensaio de desgaste por abrasão.

O interesse no desenvolvimento do dispositivo deve-se a possibilidade de simular o desgaste em diversas condições, com custo reduzido, tempo minimizado e equipamento mais simples, por meio de interações tribológicas em diversas condições. O desenvolvimento de pesquisas na área direcionada ao estudo do desgaste na Universidade Federal de Pernambuco surge com o crescente interesse do pólo industrial e, principalmente, com a instalação de novos pólos fabris no estado. Dessa forma, a Universidade não vem apenas retomando suas pesquisas acerca do tema, mas também, vem buscando se aliar a outras instituições do país, inserindo-se no campo de estudo relacionando atrito, desgaste e lubrificação.

Considerando essas informações iniciais, a presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, sendo que o primeiro aborda a importância do estudo e os objetivos do trabalho. O segundo, trata de apresentar uma revisão literária sobre o objeto do estudo, apresentando conceitos relativos ao tema, uma abordagem breve sobre tribologia (história, definição, tipos de ensaios), apresenta também a definição e descrição do desgaste, destacando o mecanismo de desgaste abrasivo. Posteriormente, apresenta uma descrição sobre aspectos relevantes do aço Hadfield.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e os materiais utilizados na pesquisa, exibindo as etapas da montagem do dispositivo, a descrição do ensaio, os parâmetros utilizados e os materiais empregados. No quarto capítulo aborda-se a discussão dos resultados obtidos na pesquisa e os correlaciona com trabalhos disponíveis na literatura. No capítulo são apresentadas discussões sobre os resultados utilizando-se diferentes tipos de materiais, mesmo tipo de material com diferentes teores de um elemento químico, comparação de resultados obtidos em diferentes instituições, parâmetros que influenciam o ensaio, entre outros. O quinto capítulo exhibe as conclusões do trabalho e alguns comentários acerca dos resultados. No mesmo capítulo são propostos trabalhos complementares podendo contribuir para a continuidade da pesquisa.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo montar um equipamento para ensaios de desgaste abrasivo do tipo pino disco e avaliar o comportamento abrasivo do aço Hadfield com diferentes teores de carbono submetido ao ensaio. Os ensaios foram reproduzidos sob as mesmas condições, utilizando o aço SAE 1045 e uma liga de alumínio 6351-T6, com objetivo de verificar a precisão dos resultados através de comparação obtida em ensaios realizados na USP e UFPE, assim como o aço Hadfield.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Montar um abrasômetro do tipo pino-disco.
- Avaliar o comportamento tribológico de uma liga de alumínio 6351- T6 e um aço SAE1045 variando o tamanho do abrasivo;
- Analisar o efeito de diferentes carregamentos sob o aço SAE1045, alumínio 6351-T6;
- Verificar a precisão dos ensaios realizados no dispositivo através de comparação com resultados obtidos sob mesmas condições (mantendo carga, variando abrasivo) em um laboratório externo (LFS-USP);
- Avaliar a influência da composição química (teor de carbono) do aço Hadfield na resistência ao desgaste;
- Analisar o comportamento do aço Hadfield em relação ao encruamento durante os ensaios variando-se o tamanho do abrasivo;
- Caracterizar o mecanismo de desgaste dos aços Hadfield no ensaio utilizando o dispositivo do tipo pino-disco.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica contendo os trabalhos mais relevantes para a pesquisa. Os estudos bibliográficos delineiam-se da seguinte forma: iniciam abordando uma contextualização sobre tribologia; em seguida, define-se o que é desgaste, bem como seus mecanismos, classificações, parâmetros que o influenciam como carga aplicada, velocidade, tamanho do abrasivo e a influência da microestrutura dos materiais. Após essa exposição, são apresentadas as técnicas aplicadas para medir e avaliar o desgaste e, finalmente, será abordada uma discussão sobre o aço Hadfield, a influência de seus constituintes mediante ao ensaio de desgaste abrasivo.

#### 2.1. TRIBOLOGIA

##### 2.1.1. Histórico

O homem sempre buscou, através do trabalho, adaptar-se ao ambiente para satisfazer suas necessidades básicas. Desde a Pré-história, busca agregar habilidades de modo a desenvolver técnicas e ferramentas úteis para o ser humano. Grandes transformações na sociedade ocorreram com o início da Revolução Industrial, destacando-se a automação dos processos industriais que reduziu a utilização da mão-de-obra humana em etapas do processo que até então eram predominantes, auxiliando, dessa forma, o ser humano e disponibilizando conforto e agilidade nas atividades.

Em 2000 A.C. houve indícios do surgimento do primeiro dispositivo tribológico da humanidade, a roda. A partir daí, deu-se início à utilização do movimento rotativo. Os dados mais antigos em que consta a utilização da roda ocorreram na antiga Babilônia, por volta de 3500 A.C. Nesse período também foram encontrados os primeiros vestígios de utilização de um lubrificante de origem animal nos mancais das rodas de uma carruagem. Desde então, foi intensificada a aplicação tribológica na humanidade, como, por exemplo, no Egito antigo, durante o movimento de grandes monumentos, onde utilizavam rolos e pranchas, bem como a aplicação de um líquido como lubrificante (SINATORA, 2005).

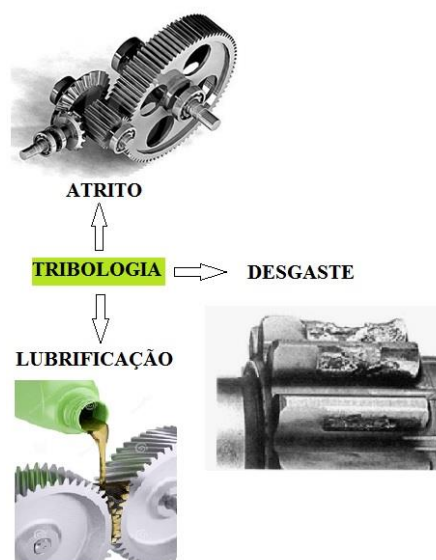
Anos se passaram e a sociedade se deparou com o avanço tecnológico e a demanda industrial que cresceram rapidamente. Sendo assim, foi necessária a expansão do conhecimento na área tribológica, surgindo uma vasta gama de elementos tribologicamente eficientes. Era o advento da ciência e da tecnologia das superfícies em contato e em movimento relativo vislumbrando investigar o atrito, o desgaste e a lubrificação de diversos tipos de materiais.

É um tema de pesquisa interdisciplinar, envolvendo conhecimentos da engenharia mecânica, da engenharia dos materiais, da física e da química. Comumente, muitos componentes e dispositivos são desativados por conta do desgaste excessivo, como, por exemplo, um disco de freio, engrenagens, sulcos de um pneu, entre outros.

### 2.1.2. Definição

Desde 1966 o termo ~~tribologia~~ é amplamente conhecido sob a concepção de dissipação e transmissão de energia em equipamentos mecânicos que incluem vários fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação, conforme exibido na figura 2.1. De acordo com Sinatora (2005), a palavra tribologia, etimologicamente significa *TRIBO* = atrito, esfregar, friccionar; *LOGIA* = Estudo. Portanto, é o estudo do atrito, ou seja, o estudo do movimento de um corpo sob a ação de uma força em relação a um segundo corpo, formando um sistema dependente de alguns parâmetros.

**Figura 2.1** Esquema dos fenômenos estudados na tribologia.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

Horst Czichos (1978) enfatiza alguns pontos importantes atribuídos ao estudo da tribologia como aspectos econômicos que, segundo o autor, 70% da energia gerada na indústria não é consumida, ou seja, trata-se de uma ineficiência energética considerável. Isto converge para um indicador importante para a tribologia, visto que se trata de conservação e eficiência na utilização da energia. O autor menciona também o aspecto científico, onde transcreve sobre a irreversibilidade dos processos macroscópicos e onde a tribologia pode investigar detalhadamente os processos irreversíveis de mecânica e explicar os efeitos complexos de energia e material de dissipação. Por fim, o autor menciona a multidisciplinaridade da tribologia, em que a conexão entre as ciências é perceptível já que a interação das superfícies depende de inúmeros aspectos, conectando áreas como: física, química, ciência dos materiais, engenharia mecânica, entre outras.

A tribologia tem sido importante em numerosas aplicações industriais que requerem movimento relativo. A respeito disso destacam-se estradas de ferro, automóveis, aviões, componentes de máquinas de fabricação (rolamentos, retentores, engrenagens), produtos de cuidados biomédicos e de beleza, entre outras diversas aplicações.

### **2.1.3. Tribossistema**

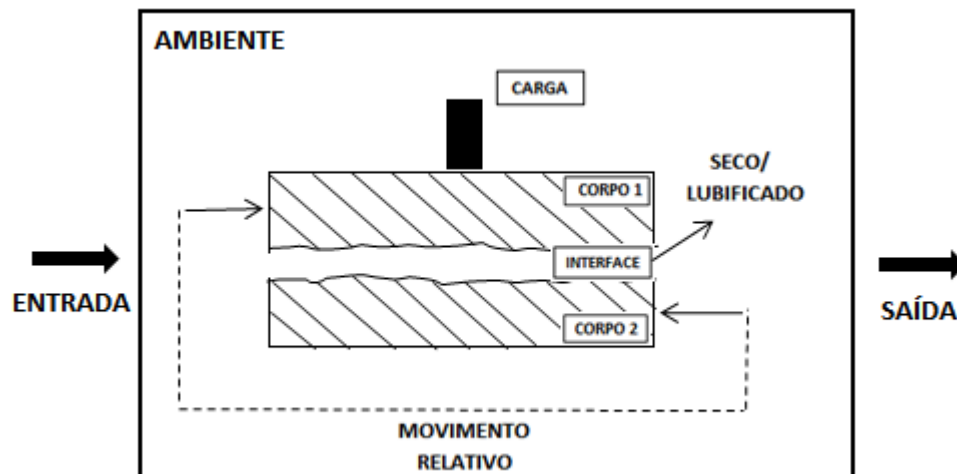
O sistema tribológico ou tribossistema é um fenômeno dependente de um conjunto de fatores que auxiliará no estudo dos mecanismos de desgaste, atrito e lubrificação, não sendo apenas dependentes das propriedades dos materiais. De acordo com Horst Czichos (1978), essas medidas são influenciadas pelos mecanismos do sistema, ou seja, as condições de ensaio, condições do ambiente, aspectos superficiais, presença de lubrificantes, óxidos ou abrasivos, tipo de desgaste envolvido, etc.

O mesmo autor propõe ainda uma definição de tribossistema, em que se constituiu em um sistema composto por quatro elementos: contra-corpo (corpo 1), corpo (corpo 2), interface e ambiente. figura 2.2 descreve o sistema delimitado por uma fronteira, onde ocorrem trocas, entradas e saídas com o exterior.

Como entrada para o sistema pode-se ter: forças, velocidades, entre outros, resultando como saída: movimento, atrito, desgaste, calor, vibração. Portanto as saídas são afetadas diretamente pela entrada no sistema.



Figura 2.2 - Esquema do sistema tribológico.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

## 2.2. DESGASTE

A ASTM G40-01 (2011) define como desgaste a perda de massa resultante da interação entre as partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem. Segundo Zhang (2004), a enciclopédia de tribologia define o termo "desgaste" como "perda contínua indesejável de material provenientes do contato entre duas superfícies em movimento relativo", ainda menciona que os autores, Kraselsky e Alisin descrevem que o desgaste dos materiais é um processo de destruição de superfície de sólidos em fricção, resultando em redução das dimensões das peças na direção perpendicular à superfície de fricção.

Dubberstein (2013) *apud* Zum Gahr (1987) descreve que o desgaste depende de todo o sistema tribológico no qual está submetido, onde diversas variáveis influenciam consideravelmente. Ainda são citadas como variáveis que influenciam no fenômeno: tenacidade à fratura, carga normal aplicada, dureza e microestrutura do material, forma e tamanho da partícula abrasiva.

Stachowiak (2005) afirma que, geralmente, no desgaste ocorre uma perda progressiva de material, devido ao movimento relativo das superfícies em contato que, conseqüentemente, gera danos à superfície, tais como: (a) degradação gerada pelo movimento dos materiais dentro da superfície (alterando a topografia da superfície, sem perda de material), (b) o desgaste causado devido ao contato de pelo menos dois materiais, submetidos à ação de determinada força e sob movimento constante, (c)

quando partículas duras estão dispersas entre a interface corpo (1) / corpo (2) em movimento, provenientes de processo de corrosão, fragmentos gerados por alguma tensão repentina ou por corpos estranhos gerados no processo.

O desgaste é um grande problema encontrado na indústria, pois facilmente é possível evidenciar uma parada inesperada de algum equipamento, por problemas relacionados ao desgaste de algum componente que o constitui. Algumas empresas adotam metodologias de manutenção preventiva com intuito de minimizar os efeitos causados pela falha prematura de um componente. Para isso, utilizam técnicas de monitoramento de componentes, planos de lubrificação regulares, avaliação de desgaste por partículas encontradas em análise de óleo, por meio de manutenção preditiva utilizando técnicas de espectroscopia e ferrografia.

### **2.2.1. Modelos de desgaste**

Na literatura é possível encontrar centenas de equações que tentam transcrever o comportamento do mecanismo relacionado ao desgaste, porém esse modelamento não é simples, justificado pela grande variedade de mecanismos e transições envolvidas no processo, impossibilitando designar um modelo universal. No entanto, três tipos de equações se destacam: equações baseadas nos mecanismos de contato, equações empíricas e equações baseadas nos mecanismos de falha dos materiais. (BRUNETTI, 2012).

A equação mais empregada é derivada da equação de Archard (Equação 2.1), que permite quantificar a severidade do desgaste, por meio do coeficiente K, porém o autor critica o modelo, contestando que K é característica do tribossistema e não dos materiais. Sendo assim, a constante é dependente do sistema, portanto, cada sistema deve ser avaliado para a determinação da constante K. Outra crítica referente ao modelo é que segundo o proposto pela equação que o descreve, o desgaste aumenta com o carregamento, porém a linearidade proposta pelo modelo não é conciso, pois, essa linearidade prevista vale em intervalos relativamente pequenos, além de que variações de carga, temperatura, por exemplo, possivelmente geram alterações no mecanismo de desgaste (MACHADO, 2015).

$$Q = \frac{K W}{H} \quad \text{Equação (2.1)}$$

Onde:

Q ó volume desgastado do material pela distância percorrida [ $\text{m}^3/\text{mm}$ ].

K ó constante adimensional de desgaste [0... 1].

W ó carga normal [N].

H ó dureza do corpo mais mole [ $\text{N.m}^{-2}$ ].

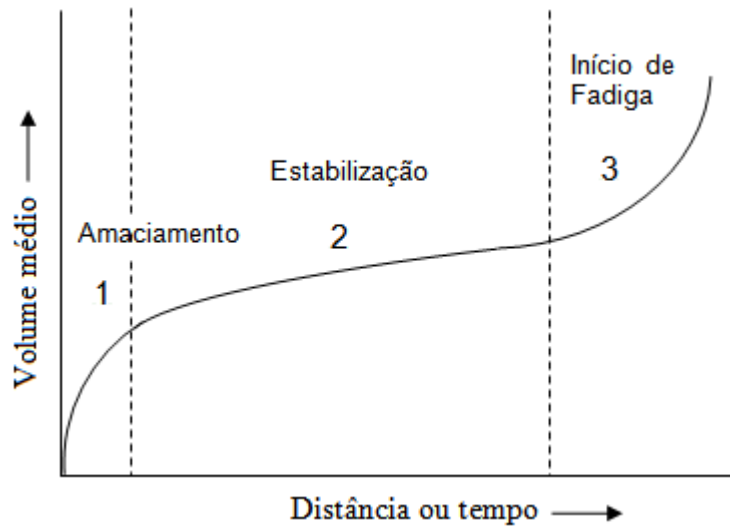
As equações empíricas são construídas a partir de dados obtidos por intermédio de testes com objetivo de prescrever equações as quais prevêm condições semelhantes ao ensaio que a originou, correlacionando o desgaste com algum parâmetro (velocidade, carga, tempo), porém essas equações se limitam em apenas construírem informações sob as condições muito próximas do ensaio.

### 2.2.2. Etapas de desgaste

Os sistemas de desgaste compreendem duas fases: assentamento ou amaciamento e o progressivo (BATISTA, 2002). A fase denominada de amaciamento ou desgaste de partida é caracterizada pela acomodação da superfície submetida ao movimento relativo associado à ação de uma força, resultando em conformidade topográfica. Na primeira fase, quando a superfície ainda não está deformada, o desgaste atua promovendo uma planicidade da superfície, reduzindo a rugosidade inicial e acomodação entre as superfícies. Durante o período de amaciamento, camadas encruadas e camadas de óxido são formadas (NEALE, 1993). Alguns autores mencionam que na fase de amaciamento observa-se uma combinação de mecanismos, principalmente de abrasão e adesão, cujos operam simultaneamente e que a taxa de desgaste diminua até que ocorra sua estabilização que termina quando o componente passa a ser submetido ao mecanismo de fadiga.

A figura 2.3 exibe um gráfico típico de desgaste ao longo da vida de um componente. Nele, Observa-se a taxa de desgaste inicial elevada (1) que diminui à medida que as asperezas superficiais são removidas e as superfícies em contato se acomodam e aplainam-se. Seguidamente (2), os detritos gerados no início são removidos e, conseqüentemente, o desgaste estabiliza. Na fase (3) ocorre aceleração do desgaste e o mecanismo de fadiga (CAMILO, 2010).

**Figura 2.3 6** Gráfico do desgaste ao longo da vida útil de um componente.

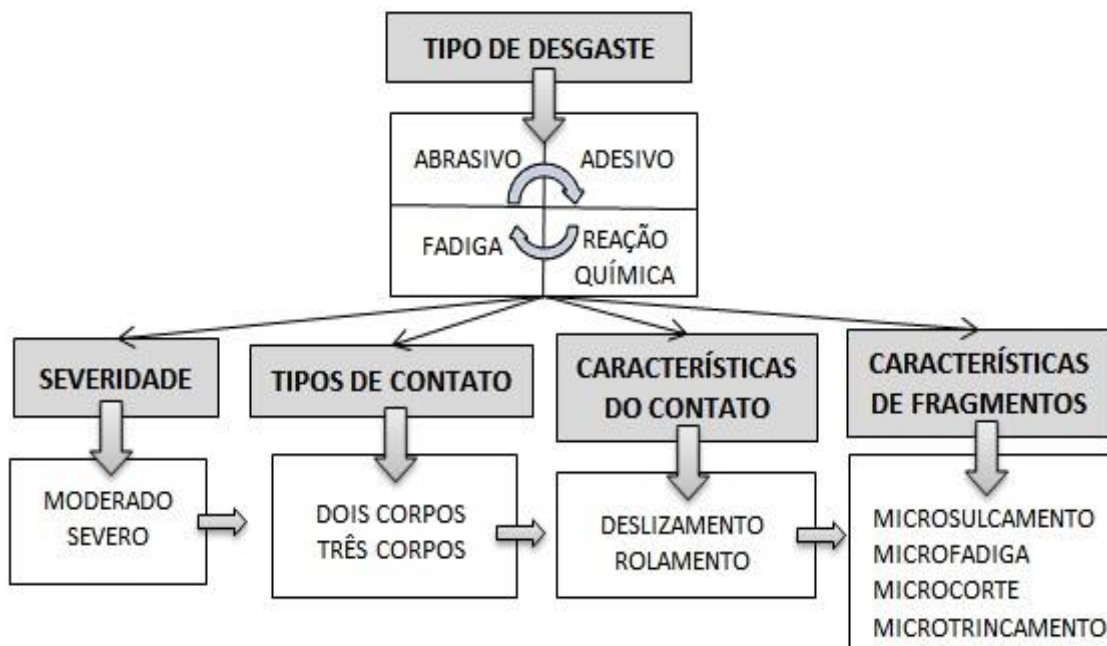


Fonte: Adaptado de CAMILO (2016).

### 2.2.3. Classificação e mecanismos de desgaste

As propostas mais mencionadas na literatura sobre a classificação do mecanismo de desgaste abrangem os tópicos descritos no fluxograma da figura 2.4. O mecanismo pode ser classificado de acordo com os seguintes aspectos: tipo de desgaste, sua severidade, o tipo e a características de contato e as características do tipo de fragmento ou marca gerada após a ação do mecanismo.

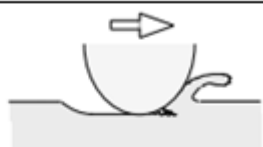
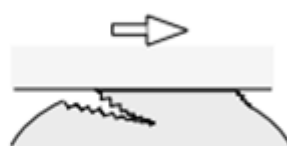

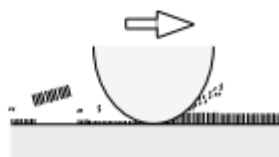
**Figura 2.4 6** Fluxograma das classificações do mecanismo de desgaste abordadas na literatura.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

De acordo com a DIN 50320, existem quatro mecanismos de desgaste (Figura 2.5): desgaste por abrasão, desgaste por erosão/cavitação, adesão ou fricção, desgaste corrosivo ou por impacto. Uma combinação entre os mecanismos é possível, porém estima-se que, em maioria, os problemas industriais de desgaste estão associados ao desgaste por abrasão. Como o objetivo do trabalho é apresentar o desgaste abrasivo, os demais mecanismos serão apenas mencionados na figura 2.5.

**Figura 2.5** 6 Mecanismos de desgaste segundo DIN 50320.

MECANISMO	CONDIÇÕES	REPRESENTAÇÃO DOS MODELOS DE DESGASTE
ABRASÃO	Remoção por sulcamento, corte, fadiga e trincamento.	
ADESÃO	Ocorre a formação de ligações adesivas interfaciais e seu rompimento. EX: Juntas soldadas a frio.	
FADIGA	Ocorre quando o componente submetido a fadiga mecânica forma trincas superficiais devido tensões cíclicas superficiais que resultam na falha do material.	
REAÇÃO TRIBOQUÍMICA	Há formação de produtos devido reações químicas entre os elementos no sistema tribológico, normalmente oxidação.	

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Quanto à severidade do desgaste, a classificação define como: regime moderado ou severo, baseado na taxa de desgaste, conseqüente de outros fatores que serão abordados posteriormente. Williams (2000) faz distinções entre o desgaste severo e o moderado. Segundo o autor, a superfície do desgaste moderado é lisa, enquanto que no desgaste severo a superfície apresenta aspecto mais rugoso e ausência de uma camada de óxidos. O diâmetro dos debrís, ou seja, dos fragmentos, é também um aspecto característico para cada regime: no severo os diâmetros são maiores que 10µm,

enquanto que no moderado não ultrapassam a ordem de 100nm. O coeficiente de atrito também se insere em distinções entre os regimes, onde no desgaste moderado exhibe baixo coeficiente, enquanto que, no regime severo predomina altos valores.

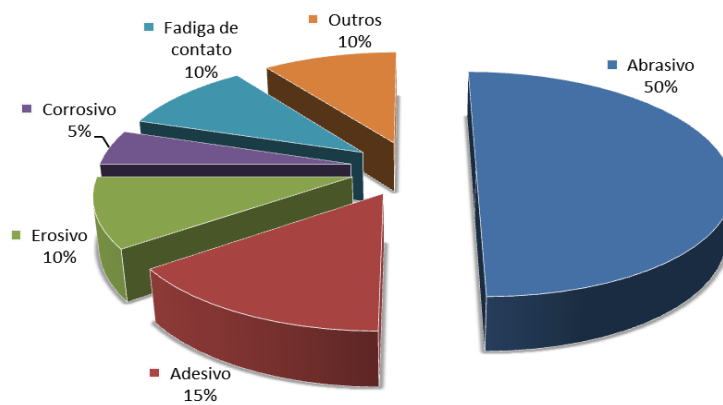
O contato das partículas durante o mecanismo de desgaste pode ser por dois ou três corpos, nos quais se projetam os danos causados na superfície de contato. A figura 2.4 cita as características desse dano gerado pelo contato por deslizamento das partículas na superfície durante o mecanismo do desgaste designando-as: riscamento e rolamento. Entretanto, é possível encontrar na literatura características por impacto e fluxo, porém, não é objetivo do trabalho.

## **2.3. DESGASTE ABRASIVO**

### **2.3.1. Definições**

Segundo a ASTM G40, o desgaste abrasivo ocorre devido a partículas ou protuberâncias duras, forçadas uma contra a outra e movendo-se ao longo da superfície sólida. Já Hutchings (1992), descreve que durante o desgaste abrasivo o material é movimentado em uma superfície por partículas duras ou asperezas de um contra-corpo, e remoção de material. Portanto, o desgaste abrasivo está correlacionado com o movimento de pelo menos duas superfícies em contato e que durante o movimento sobrevenha um dano progressivo que envolva a perda de material.

No setor industrial, o desgaste abrasivo é o mecanismo que apresenta a maior perda entre as outras formas de desgaste, ocasionando prejuízos significativos. Um dos fatos que mais evidencia essa observação é a contaminação por partículas abrasivas em equipamentos mecânicos, esse fenômeno se dá principalmente em operações relacionadas com movimentação de terra. No gráfico apresentado na figura 2.6, observa-se que perdas relacionadas ao mecanismo do desgaste abrasivo no cenário industrial são de 50%, seguidas de: adesivo 15%, erosivo e fadiga, 10%, e, finalmente, corrosivo 5%. (ALBERTIN, 2003).

**Figura 2.6 6** Diagrama do tipo de desgaste encontrado na indústria.

Fonte: Adaptado de EYRE (1966).

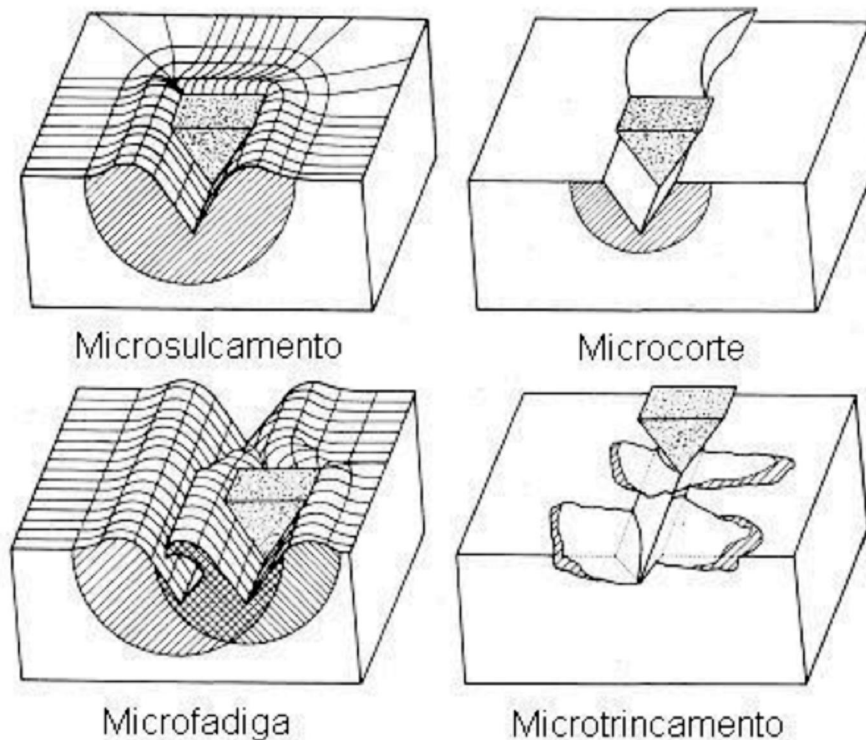
Considerando os dados apresentados por Sinatora (2005), em que há uma perda aproximada de 1-6% do PIB nacional ó e, atualmente, o PIB nacional equivale a R\$ 5,904 trilhões ó, pode-se estimar que o Brasil apresenta um déficit de até R\$ 354 bilhões anuais, provenientes de perdas geradas por problemas relacionados ao desgaste, sendo 177 bilhões oriundos do mecanismo abrasivo.

Existem diferentes tipos de mecanismos de desgaste que resultam na extração de material da superfície ou até mesmo na fratura. Zum Gahr (1987) propôs quatro diferentes tipos de mecanismos de desgaste: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento.

Segundo Neves (2004), o desgaste abrasivo é classificado em três tipos: (a) riscamento sob baixas tensões, (b) abrasão em moagem sob altas tensões e (c) sulcamento. Quanto ao fragmento resultante das três diferentes classificações o autor destaca que no riscamento sob altas tensões observa-se formação de riscos na superfície ocorrendo o microcorte, que consiste na formação de micro-cavacos proveniente da tensão cisalhante localizada na frente da partícula abrasiva. Em altas tensões ocorre a ruptura do abrasivo, provocando maior penetração dos abrasivos e, conseqüentemente, maiores deformações plásticas, fadiga e trincamento nos microconstituintes. No sulcamento, o autor associa a resistência ao impacto do material submetido ao desgaste provocado por abrasivos grosseiros. No mecanismo, praticamente não há perda de material com a deformação plástica, pois, ocorre o acúmulo de material deformado na frente da partícula. Distribuindo-se lateralmente acumula-se em ambos os lados do sulco (AVERY (1954) *apud* NEVES (2004)).

Geralmente, o desgaste abrasivo pode ser caracterizado pelo mecanismo de corte ou sulcamento e ocorre quando partículas duras são projetadas de uma superfície sob pressão contra outra superfície ou até mesmo suspensas em fluidos, sendo a característica principal riscos na direção do deslizamento. Abaixo, a figura 2.7 detalha a descrição proposta por Gahr sobre os diferentes tipos de mecanismos de desgaste.

**Figura 2.7** - Diferentes micromecanismos de desgaste propostos.



Fonte: Zum Gahr. (1987).

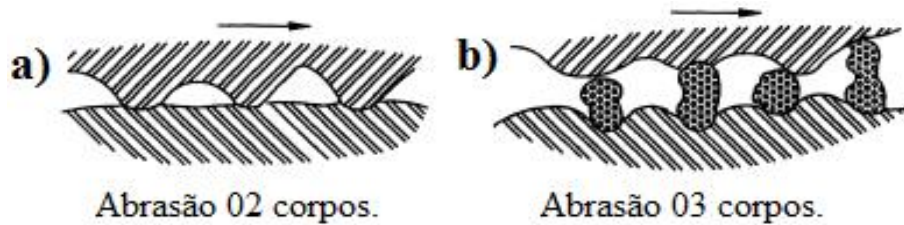
Os mecanismos causadores do desgaste abrasivo são classificados por deformação plástica e fratura frágil. Hutchings (1992) menciona três mecanismos de deformação plástica: (1) microcorte (remoção de material sob forma de cavacos), (2) sulcamento (não há remoção de material superficial, nesse caso, há formação de cristais laterais) e (3) o intermediário (ocorre a formação da proa). Na fratura frágil, ocorre o trincamento, devido ao repetitivo contato entre as partículas, as quais, com dureza elevada, superam o limite de resistência das superfícies dos materiais mais frágeis.

Pintaúde (2002) destaca que o desgaste abrasivo é classificado usualmente como de dois ou três corpos. Segundo o autor, o desgaste acontece sob forma de um sistema. No caso de abrasão de dois corpos as partículas ou asperezas estão rigidamente fixas em um segundo corpo, ou seja, a partícula está incrustada em uma das superfícies (Figura



2.8-a), penetrando e produzindo riscos no primeiro corpo, enquanto no caso da abrasão por três corpos (Figura 2.8-b), os abrasivos estão livres para se movimentar e rolar.

**Figura 2.8** Tipos de contato abrasivo.

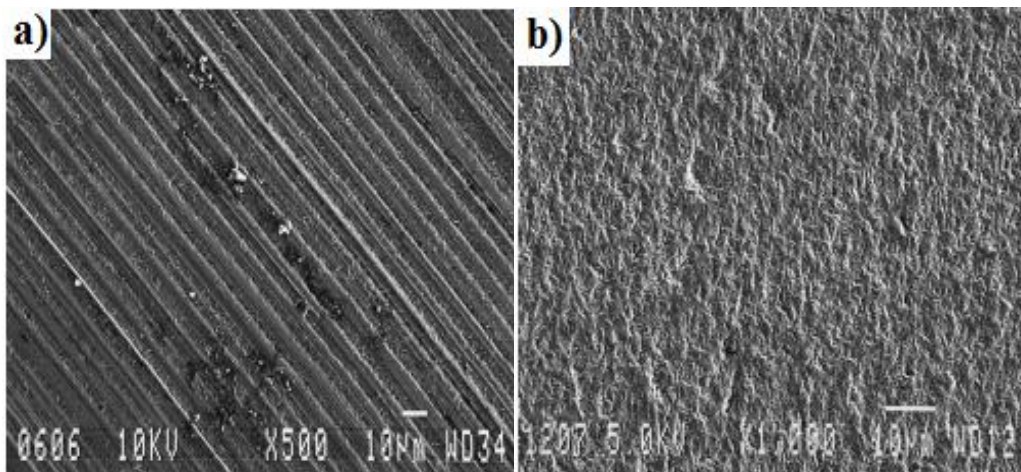


Onde: (a) Abrasão de dois corpos (b) Abrasão de três corpos.

Fonte: BAYER (2004).

As marcas geradas pelo desgaste variam de acordo com o tipo de desgaste abrasivo empregado. O tipo dois corpos, por exemplo, apresentam características de desgaste abrasivo por riscamento (*grooving abrasion*), onde as partículas deslizam sobre a superfície, enquanto que no de três corpos o desgaste se dá em meio de partículas rolando sobre a superfície, ou seja, desgaste abrasivo por rolamento (*rolling abrasion*) (CÂMARA, 2006). No trabalho de Gómez (2014), o autor apresenta micrografias das superfícies desgastadas sob ambas as condições, adaptada de Trezona *et al* (1999), conforme disposto na figura 2.9.

**Figura 2.9** - Micrografias das superfícies desgastadas para o aço ferramenta



Onde: a) desgaste abrasivo por riscamento, b) desgaste abrasivo por rolamento. Submetidos à carga de 0,25N.

Fonte: TREZONA *et al.*, (1999).

### 2.3.2. Parâmetros que influenciam o desgaste abrasivo

A resistência ao desgaste abrasivo não é uma propriedade intrínseca dos materiais, ela é um conjunto de fatores que compõe um sistema, como mencionado anteriormente, trata-se do tribossistema. Geralmente, dependente do sistema (carga aplicada, tipo de movimento, a temperatura e o meio), das condições de operação (área de contato, condições da superfície do componente e regime de lubrificação), do tipo do abrasivo (dureza, geometria, tamanho e ductilidade) e do material (composição da liga, microestrutura, endurecimento superficial e revestimento) (ZUM GAHR, 1987).

A figura 2.10 apresenta os principais parâmetros que influenciam na ação abrasiva do contato entre pelo menos dois corpos. De acordo com o que o autor destaca, há quatro tópicos que influenciam no mecanismo: características do projeto, condições de operação, o abrasivo e as propriedades do material a ser submetido ao desgaste.

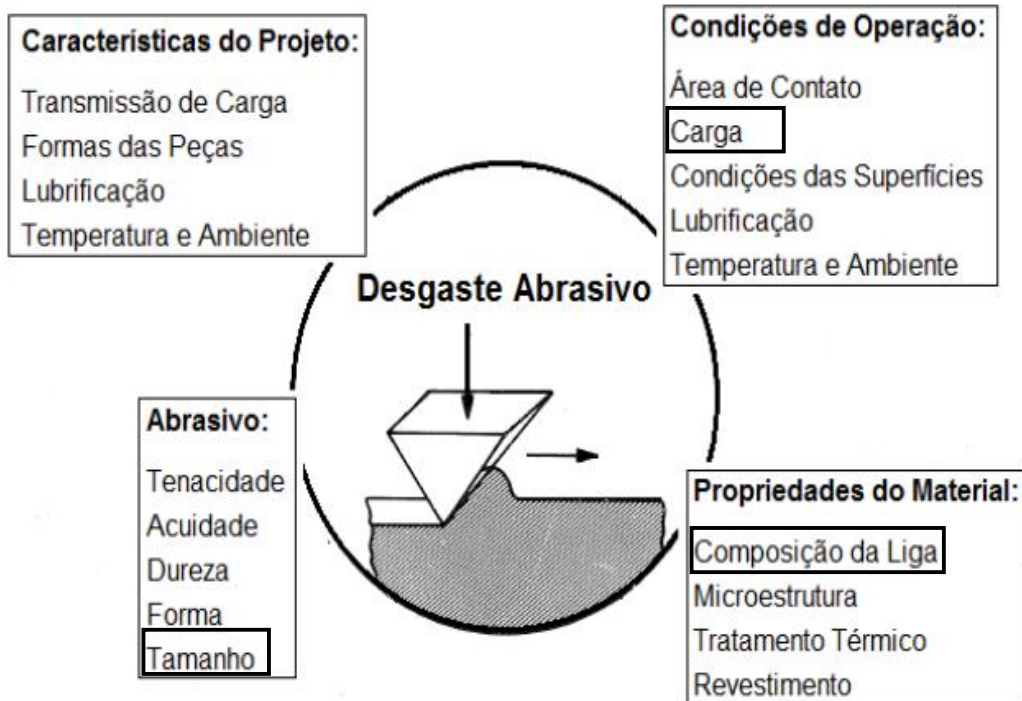
As características do projeto são de extrema importância, pois, fixam limites ao projeto restringindo assim sua aplicabilidade em condições extremas e permitindo que o produto apresente um ciclo de vida estimado pelo projeto. O autor destaca na figura abaixo algumas condições extremamente importantes: a) Transmissão de carga - representa a possibilidade de receber carga, sua distribuição em sua geometria; b) Formas das peças ó especificação geométrica; c) Lubrificação ó Necessidade de lubrificação, tipo de lubrificantes, quantidade, etc; d) Temperatura e ambiente ó Condições do projeto quando submetido a determinadas condições ambientais e operacionais.

As condições de operação avaliam o desempenho do produto conforme suas especificações técnicas e diversos fatores. No caso de corpos submetidos a ensaios de desgaste abrasivo, fatores como: área de contato, a carga, as condições das superfícies, a presença de lubrificação e se a temperatura ou o ambiente influenciam, devem ser considerados pilares de um conjunto de atributos importantes para o tribossistema, como mencionado anteriormente.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa alguns parâmetros do sistema tribológico foram utilizados para averiguar sua influência no ensaio dos materiais. Para tal feito, ficou delimitado investigar o comportamento dos materiais quando submetidos à variação de carga (condição de operação), diferentes composições da liga (propriedades do material) e tamanho diferentes dos abrasivos. A figura 2.10 exibe um

esquema que transcreve todos os parâmetros e destaca aqueles que serão abordados experimentalmente durante a pesquisa.

**Figura 2.10** - Parâmetros do sistema tribológico que influenciam o desgaste abrasivo,



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

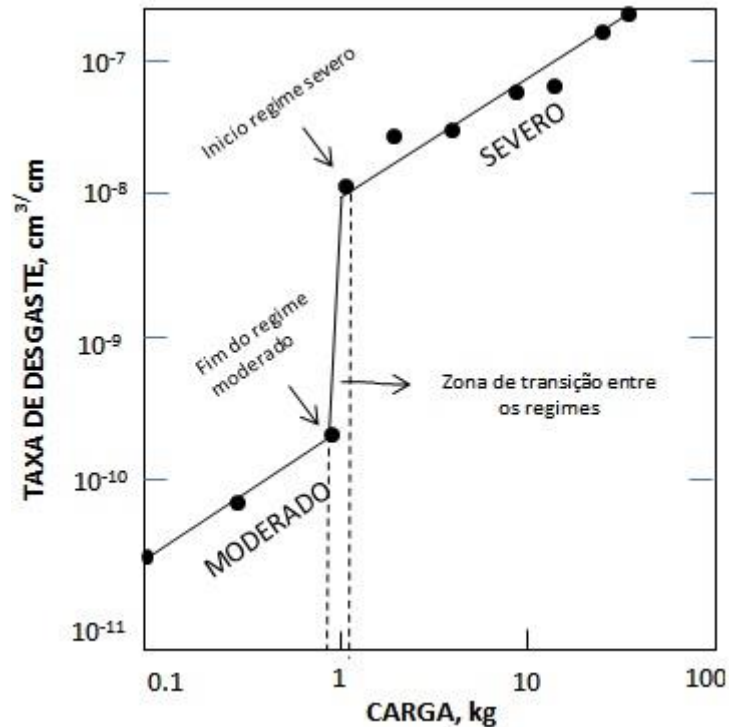
Alguns fatores mencionados levam destaque e devem ser detalhados ao longo do trabalho. De fato as variáveis relacionadas acima: carga aplicada, tamanho da partícula abrasiva e a composição da liga exercem, sem dúvida, uma importância preponderante no desgaste. Sendo assim, o efeito dessas variáveis na abrasão será explorado sucintamente a seguir.

### 2.3.2.1. O efeito da carga no desgaste

O comportamento do desgaste abrasivo do latão 60/40, sob forma de pino, atritado em um anel de stellite (61% Co, 30%Cr) foi avaliado por Hirst e Lancaster (1956). Os resultados obtidos no experimento forneceram informações suficientes para os pesquisadores afirmarem que a carga que atua sob o sistema influencia na taxa de desgaste e que aumentando a carga obtem-se o aumento na taxa. Entretanto, observaram uma faixa de transição em relação à carga aplicada na taxa de desgaste, permitindo, assim, delimitar os regimes moderado e severo, atualmente conhecidos (figura 3.11). A

essa faixa de transição denominou de carga crítica e segundo descreveram: valores de taxa de desgaste acima da carga crítica estariam sob ação do regime severo, enquanto abaixo prevalece o regime moderado (CAMILO *apud*, 2010).

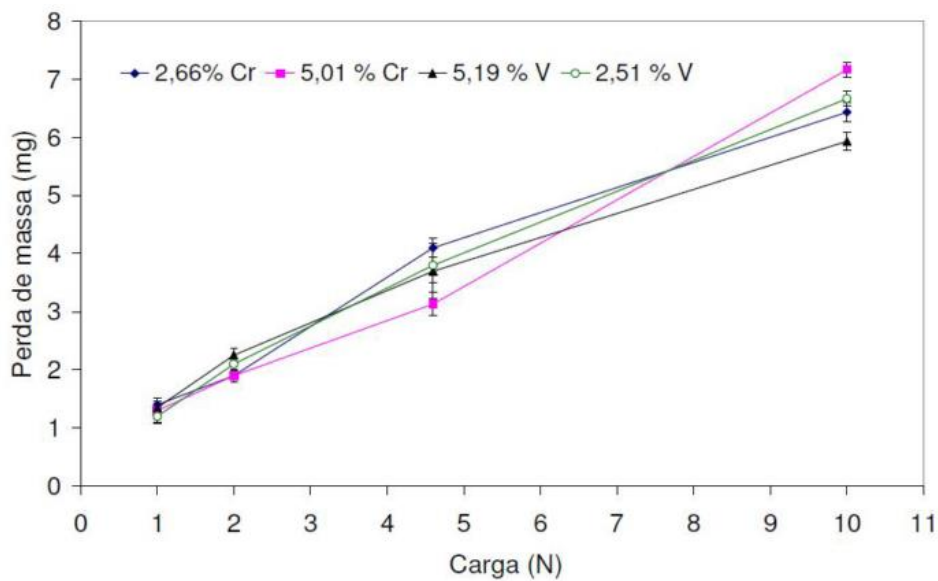
**Figura 2.11** 6 Variação da taxa de desgaste em função da carga aplicada



FONTE: Adaptado Hutchings (1992).

Em ensaios de desgaste abrasivo, realizados em materiais homogêneos ou mesmo naqueles com uma segunda fase dura é observado o aumento na perda de massa com o aumento da carga. Pesquisas desenvolvidas por Coronado e Sinatora (2009) mostram o efeito da carga no desgaste abrasivo de um material com segunda fase dura, constaram que o ferro fundido com grafita, cementita e diferentes de teores de cromo e vanádio, submetidos a um ensaio em um abrasômetro do tipo pino no disco, que há um incremento na perda de massa com o aumento da intensidade da carga. A figura 2.12 apresenta os resultados de perda de massa em função da carga observados pelos autores. Os resultados fortalecem e corroboram com o que foi obtido por Zum Gahr (1987) em que o autor destaca a influência da carga no ensaio, o que pressupõe o aumento da perda de massa com a intensificação da carga aplicada.

**Figura 2.12** 6 Representação gráfica da perda de massa em função da carga aplicada

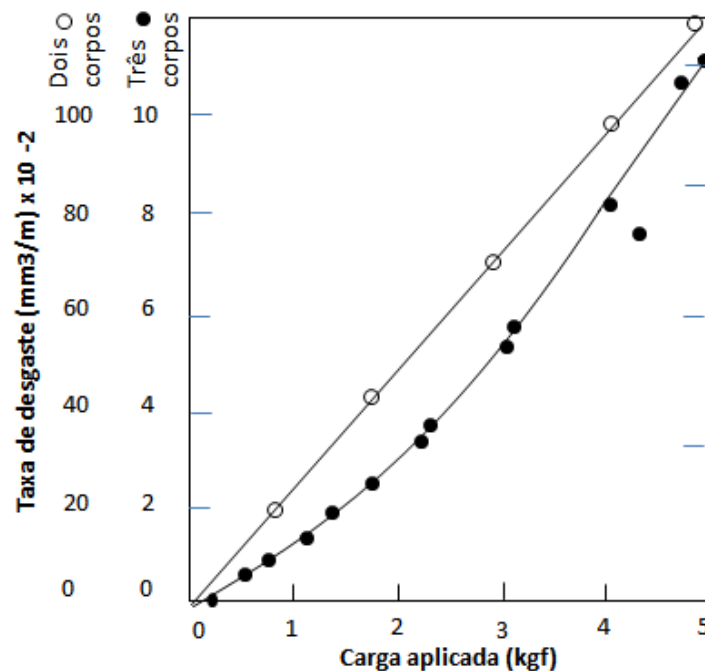


O material ensaiado foi o ferro fundido com diferentes teores de cromo e vanádio.

Fonte: CORONADO; SINATORA, 2009.

O gráfico representado na figura 2.13 apresenta a taxa de desgaste do Aço AISI 1020 em função da carga aplicada sob duas condições de ensaio: dois e três corpos. Analisando o gráfico observa-se a influência da carga aplicada quanto à da condição empregada no ensaio. Em ambas as situações (carga e condição de ensaio) verifica-se um ganho na taxa de desgaste crescente e, no caso do aço, submetido à condição de dois corpos, esse ganho apresenta visualmente uma linearidade regular.

**Figura 2.13 6** Variação da taxa de desgaste do aço AISI 1020 em função da força aplicada.



Onde: O aço foi submetido a duas condições de ensaio: dois e três corpos. Abrasivo usado: SiC 250µm

Fonte: MISRA; FINNIE (1980).

### 2.3.2.2. O tamanho da partícula abrasiva

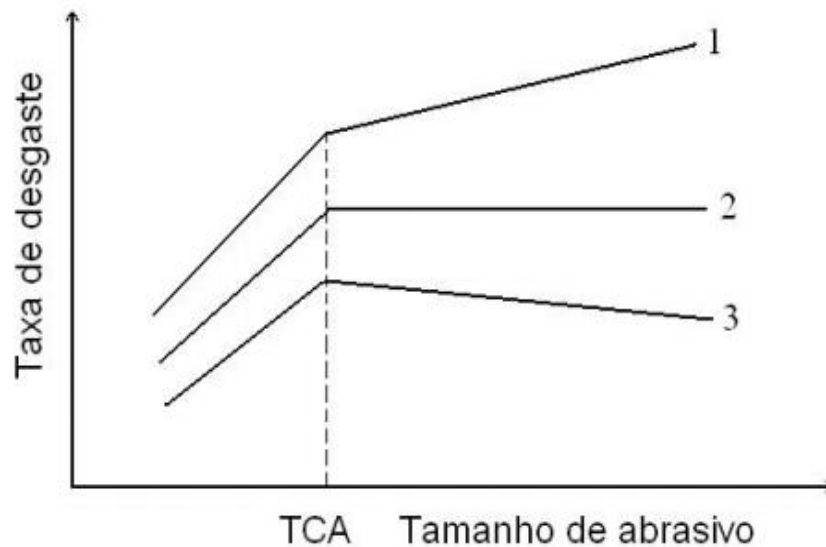
A abrasividade de um componente está intimamente ligada à capacidade de corte do grão, à capacidade de fraturar, à forma do grão que controla a taxa de remoção do metal e à distribuição das partículas, ou seja, dos grãos na superfície do abrasivo. Além do fator forma discutido no livro, o autor cita outros dois fatores cruciais para o desempenho do abrasivo: a integridade mecânica e térmica (JACKSON, 2011).

O tamanho da partícula abrasiva tem influência significativa no mecanismo de desgaste. De acordo com a literatura, quanto maior o tamanho do abrasivo, maior o desgaste do material de dureza inferior, porém há uma restrição para o transcrito, pois, autores destacam que esse aumento é linear até o TCA, ou seja, o tamanho crítico do abrasivo. O comportamento do desgaste após o TCA ainda é indescritível, pois a comunidade científica ainda encontra dificuldades para aceitação de uma explicação geral que defina esse fenômeno (DUBBERSTEIN, 2013).

Na representação mencionada na figura 2.14, é possível estabelecer uma relação entre o tamanho do abrasivo e o aumento do desgaste. Observando o gráfico, nota-se um aumento linear na taxa de desgaste em função do aumento do tamanho do abrasivo, até um tamanho crítico (TCA), onde as três curvas apresentam características

dissimilares. A curva (1) após o TCA, o desgaste permanece aumentando, porém com menor intensidade, pode ser confirmado a partir da inclinação da curva. A taxa do desgaste na curva (2) se estabilizou, mantendo-se constante, enquanto na curva (3), a taxa do desgaste diminuiu após ultrapassar a condição crítica.

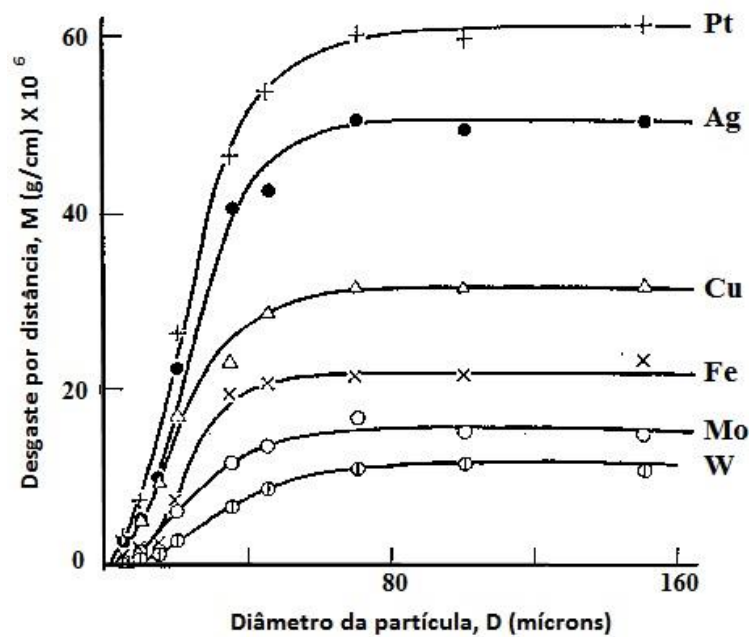
**Figura 2.14** Três condições da taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo.



Fonte: CORONADO; SINATORA (2011).

ANVIENT *et al* (1960) realizaram testes de desgaste abrasivo em metais puros: Ag, Cu, Pt, Fe, Mo e W. Analisando as curvas apresentadas na figura 2.15, verifica-se o aumento do desgaste abrasivo com o aumento do tamanho do abrasivo. Observa-se ainda que há presente nas curvas um tamanho crítico do abrasivo -TCA-. Os autores descrevem que as taxas de desgaste tornaram-se independente do tamanho do abrasivo de granulometria próxima de  $70\mu\text{m}$ , tornando-se constante no intervalo de 70 a  $140\mu\text{m}$ .

Figura 2.15 6 Curvas que exibem o comportamento no desgaste para diversos metais.



Fonte: ANCIEN *et al.* (1960).

Mezlini *et al.* (2005) faz uma referência ao impacto do tamanho do abrasivo em relação ao dano causado. O autor cita um exemplo prático para ilustrar a condição: a diferença de danos causados pelo transporte granular de material (areia e cascalho) nas chapas de alumínio usadas em caminhões para o seu transporte. O autor descreve que na análise granular do material foram constatadas partículas abrasivas de diferentes tamanhos e morfologias. Essa variação granulométrica, segundo o autor, influencia no ângulo de ataque da partícula, sendo um fator de impacto para a geometria formada dos fragmentos no processo de desgaste.

Diversos autores correlacionam em seus trabalhos a influência do tamanho do abrasivo com a taxa de desgaste:

Nathan e Jones (1966): Colaboraram com condução de ensaios abrasivos do tipo dois corpos em diversos materiais: cobre, alumínio, latão e aço. Os autores estudaram a correlação entre a variação do volume desgastado com o diâmetro das partículas do abrasivo SiC (35 a 710  $\mu\text{m}$ ), sob diversas condições do sistema: (carga, velocidade e distância percorrida). Como resultado os autores descrevem um aumento linear de volume desgastado no ensaio até o tamanho do diâmetro das partículas do abrasivo de 70  $\mu\text{m}$ . Acima desse valor, o gradiente decresce e, finalmente, próximo de 150  $\mu\text{m}$ , onde o volume de desgaste se torna constante.



Larsen (1968): Realizou ensaios abrasivos do tipo dois corpos em cobre, utilizando como abrasivo SiC. Observou o aumento do desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo em um intervalo de 40-80 $\mu$ m. Durante o experimento, o pesquisador observou que acima do intervalo mencionado, submetido a um carregamento pequeno, a taxa de desgaste permaneceu constante, no entanto, elevando o carregamento a taxa de desgaste diminuiu.

Misra e Finne (1981): Correlacionam a influência do tamanho do abrasivo com a taxa de desgaste no cobre, em diferentes situações: nos ensaios abrasivos de dois e três corpos submeteram ainda a condição em um ensaio erosivo. Durante o experimento observaram que a taxa de desgaste se tornou constante com tamanho de partículas abrasivas próximas de 100  $\mu$ m.

Mondal *et al.* (1998): Conduziram ensaios abrasivos a dois corpos em ligas de alumínio, visando observarem o efeito do tamanho do abrasivo no desgaste das ligas. Verificaram que tamanhos de abrasivos maiores geram o aumento da profundidade de penetração do abrasivo, resultando em um crescimento da taxa de desgaste. Como apenas três tamanhos de abrasivo foram utilizados no experimento, não permitiu afirmar a existência ou ausência um TCA.

Das *et al.* (2008): Realizaram ensaios abrasivos a dois corpos com ligas de alumínio, variando o tamanho do abrasivo. Observaram que a taxa de desgaste não varia para um mesmo material quando o tamanho do abrasivo é menor do que 60  $\mu$ m, mas quando se tem o tamanho superior a 60  $\mu$ m, a taxa de desgaste aumenta rapidamente. Os autores relacionam o efeito em função da tensão efetiva por unidade de abrasivo. Sendo assim, maior para abrasivos maiores porque a carga aplicada é dividida por um número menor de abrasivos. Já o abrasivo de granulometria menor que 60  $\mu$ m, apenas verificou o contato elástico, devido uma tensão efetiva por abrasivo menor. Os autores observaram a presença do mecanismo de microsulcamento em situações onde se tinha abrasivos maiores, o que ocorre devido ao aumento da profundidade de penetrações dos abrasivos.

Coronado e Sinatora (2009): Em alguns trabalhos os autores correlacionam a microestrutura, o efeito do tamanho das partículas do abrasivo e a taxa de desgaste. Em um de seus experimentos os autores utilizam um aço tratado termicamente em temperaturas em torno de 300°C a 600°C, formando aços com diferentes percentuais de austenita retida (AR). O aumento da taxa de desgaste é influenciado pelo tamanho da

partícula, os autores ainda associam o micromecanismo do desgaste com o tamanho do abrasivo.

Coronado e Sinatora (2011) Nesse trabalho os autores submeteram ao ensaio abrasivo do tipo pino disco, amostras de ferro fundido branco, com matriz austenítica e segunda fase dura, variando o tamanho do abrasivo, com objetivo de investigar a existência do TCA em materiais com segunda fase dura. Segundo os resultados obtidos, há o aumento linear de perda de massa em função do aumento do tamanho do abrasivo, porém, acima de 36  $\mu\text{m}$  a perda de massa aumenta em menores proporções.

Tressia (2015): O pesquisador desenvolveu um estudo utilizando dois aços: aço H13 com matriz martensítica e o aço Hadfield com matriz austenítica, ensaiados em um abrasômetro do tipo roda de borracha, com objetivo de avaliar a influência do tamanho das partículas abrasivas e o pH do meio. Os resultados caracterizam o aço Hadfield como o mais resistente ao ensaio, o autor ainda observa que o aumento do desgaste aumenta linearmente até aproximar do TCA. Após isso, a taxa cresce, porém, com proporções inferiores.

Portanto, é possível encontrar diversas contribuições científicas relatando múltiplas variáveis que influenciam no sistema. Todos os trabalhos mencionados acima demonstram a influência que o efeito do tamanho da partícula abrasiva sob o desgaste abrasivo tem. Alguns autores mencionam ainda a colaboração de efeitos de outros parâmetros utilizados simultaneamente no ensaio, como: carga aplicada, tipo de microestrutura, variação de pH do meio, diferentes condições de ensaio (dois corpos, três corpos, ensaio erosivo), entre outros.

### **2.3.2.3. A microestrutura**

Otoni (2005) aborda sobre a existência de uma relação entre a microestrutura e a taxa de desgaste. Para metais puros, a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a dureza, enquanto que nos materiais ferrosos, o aumento da resistência ao desgaste está ligado ao maior teor de carbono. O autor descreve uma relação entre microestrutura e resistência ao desgaste, afirmando que a resistência ao desgaste geralmente é aumentada conforme a mudança de microestrutura, seguindo uma sequência: ferrita, perlita, bainita e martensita; desde que seja acompanhada de aumento de dureza. Entretanto, para um mesmo valor de dureza, a estrutura bainítica apresenta maior resistência ao desgaste em relação à martensítica.

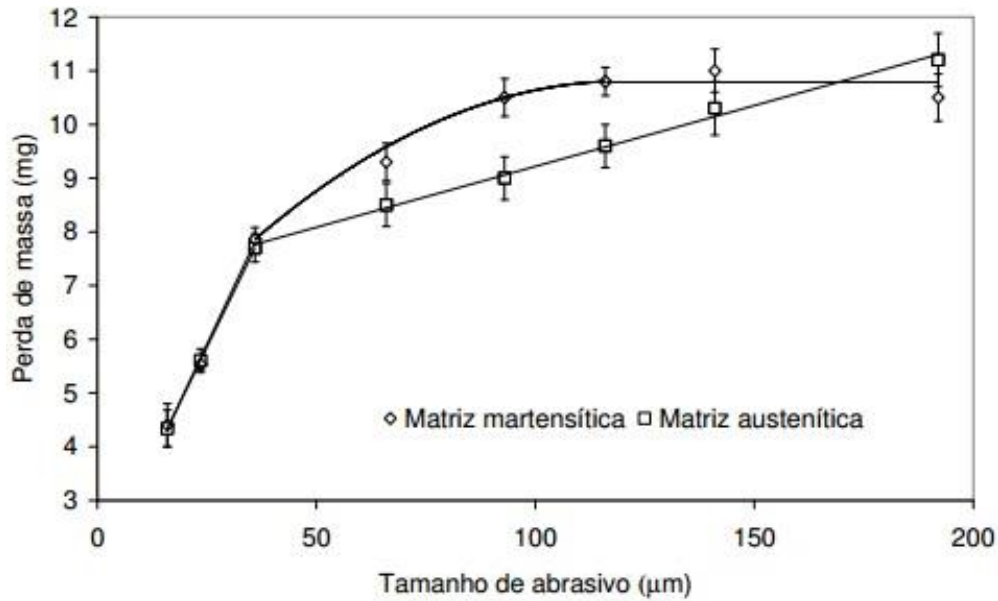
Em 1974, Diesburg e Borik realizaram ensaios abrasivos na configuração de dois e três corpos: pino-disco e roda de borracha, respectivamente, em amostras com diferentes microestruturas de aços e ferros fundidos. Os resultados apontaram que o desempenho dos materiais em diferentes testes de desgaste abrasivo altera os resultados, pois, experimentalmente, verificaram que em ensaios de abrasão a dois corpos, os materiais com matriz austenítica apresentaram maior resistência ao desgaste, enquanto que a matriz martensítica apresentou maior resistência ao desgaste nos ensaios de abrasão de três corpos.

Em 1980, Zum-Gahr e Eldis estudaram a influência da microestrutura no desgaste abrasivo para ferros fundidos brancos com alto cromo. De acordo com os autores, no ensaio de abrasão ó pino contra lixa -dois corposøó o material com matriz austenítica apresentou melhor desempenho em relação ao material com matriz martensítica, fato explicado devido à austenita ter como características: alta ductilidade e capacidade de trabalho de endurecimento.

Os três últimos trabalhos discutidos no tópico anterior, sendo dois de autoria de Coronado e Sinatora e o terceiro de Tressia, os autores correlacionam em seus trabalhos a influência da microestrutura mediante o desgaste abrasivo. Em um dos trabalhos, Coronado e Sinatora (2011) investigaram o comportamento da resistência ao desgaste de duas microestruturas com matrizes diferentes (austenita e martensita) do ferro fundido branco. Os resultados mostram que para abrasivos menores que 36  $\mu\text{m}$  as perdas de massa dos materiais se equivalem, porém o material com matriz austenítica apresentou menor desgaste, ou seja, maior resistência ao desgaste para tamanhos de abrasivo entre 66 e 116  $\mu\text{m}$ . De acordo com os autores, para criar um cavaco em uma matriz martensítica é necessário menor energia para deformação, visto que essa microestrutura apresenta maior dureza e menor ductilidade quando comparada com a austenítica.

A figura 2.16 exhibe os resultados da perda de massa do ferro fundido branco com duas matrizes diferentes, conforme discutido anteriormente.

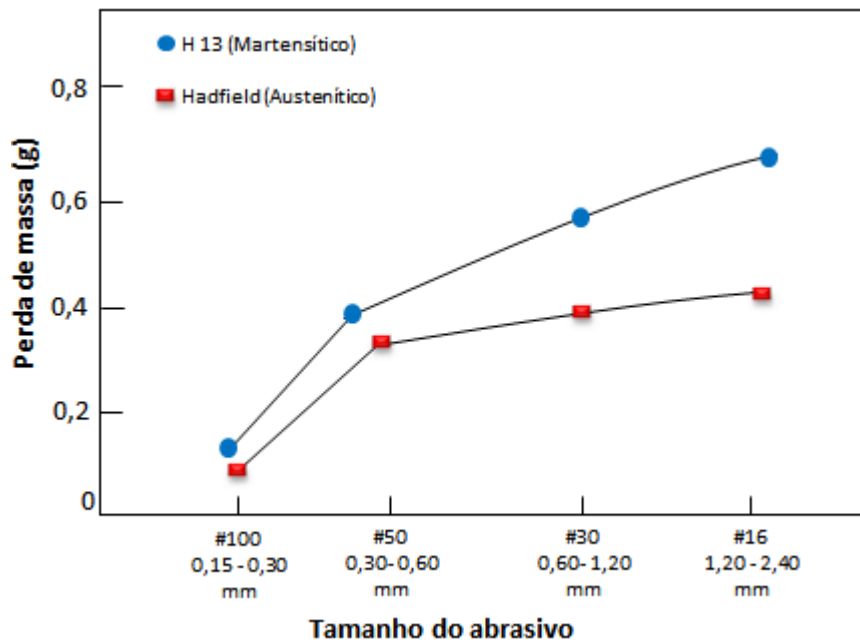
**Figura 2.16** Gráfico perda de massa no ensaio de desgaste para duas matrizes diferentes de um ferro fundido.



Fonte: CORONADO; SINATORA (2011).

A figura 2.17 exibe resultados de ensaios de desgaste de dois aços com matrizes diferentes: martensita e austenita (H13 e Hadfield), realizados em abrasômetro do tipo roda de borracha em condição úmida. Durante o experimento, o autor variou o tamanho do abrasivo e o pH do meio. Os resultados corroboraram com Coronado e Sinatora (2011), pois em todas as condições experimentais o aço Hadfield (matriz austenítica) apresentou menor perda de massa. Os autores descrevem a possível existência do TCA, na faixa de tamanho de abrasivo #50 (0,30 ó 0,60 mm) (TRESSIA, 2015).

**Figura 2.17** - Comparação entre a perda de massa média do aço H-13 e do aço Hadfield.

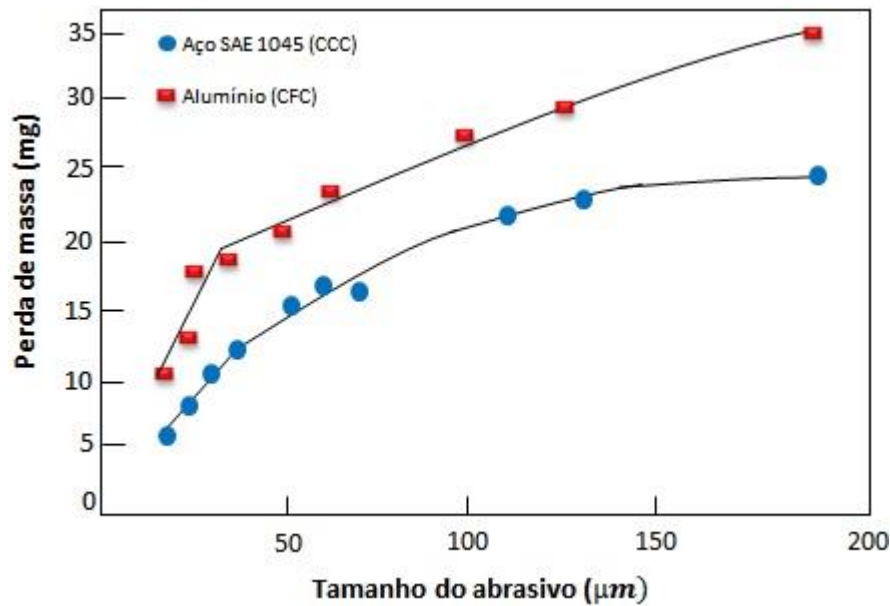


Os ensaios foram realizados em função do tamanho do abrasivo com pH 5,5 obtido com água deionizada.

Fonte: Adaptado de TRESSIA (2015).

Em outro trabalho Coronado e Sinatora, relacionam as estruturas cúbicas de face centrada (CFC) e de corpo centrado (CCC) com desgaste abrasivo. Nele, os autores realizaram ensaios em um dispositivo de configuração do tipo: pino contra lixa em alumínio (CFC) e aço SAE 1045 (CCC), variando o tamanho do abrasivo. Os resultados apontaram para o aumento de perda de massa em função de diferentes granulometrias do abrasivo e diferentes perdas de massa em função da estrutura do material (arranjo dos átomos), porém, não é possível consolidar o pressuposto já que se tratam de materiais com propriedades dissemelhantes (Figura 2.18).

**Figura 2.18** Gráfico apresentando a perda de massa em função do tamanho do abrasivo para materiais com estruturas cristalinas diferentes, CFC (alumínio) e CCC (aço 1045).



Fonte: Adaptado de CORONADO; SINATORA (2011).

É possível perceber a relação de cada variável para o tribossistema e sua colaboração para o estudo. Anteriormente, foram discutidos alguns trabalhos em que variáveis como carregamento submetido durante o ensaio, tamanho das partículas abrasivas, microestrutura, entre outros parâmetros não mencionados (velocidade, lubrificação, geometria do abrasivo) influenciam no mecanismo do desgaste. Desse modo, o estudo dessas variáveis é de extrema importância para o desenvolvimento de novos materiais e para estudos de otimização de danos provenientes do mecanismo.

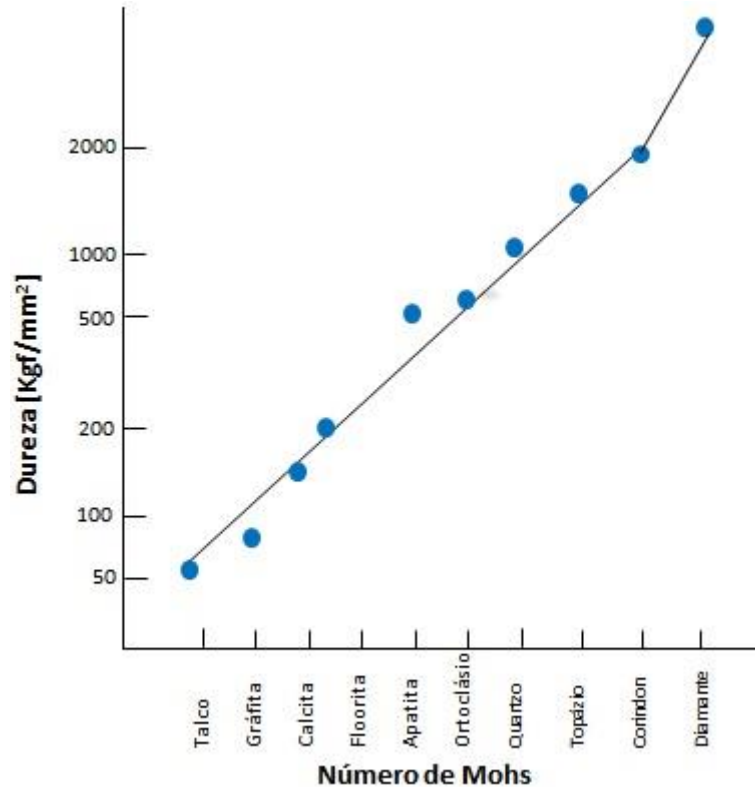
### 2.3.3. Dureza e desgaste abrasivo

A dureza é um parâmetro utilizado para selecionar materiais resistentes ao desgaste abrasivo. De acordo com Pintaúde (2004), é possível aumentar a dureza do material e conjuntamente não alterar significativamente a tenacidade à fratura. O autor menciona como exemplo o aço Hadfield empregado em operações de britagem, em que é necessária a combinação entre dureza e tenacidade, favorecendo assim a resistência à abrasão e aumento da vida útil do componente.

Pintaúde (2004) cita alguns autores que desenvolveram pesquisas com objetivo de relacionar desgaste abrasivo e dureza. Inicialmente, Tabor (1956) investigou a escala de dureza Mohs. Na pesquisa, o parâmetro utilizado foi a obtenção da dureza Vickers de

cada mineral presente na escala Mohs. Os valores foram correlacionados em um gráfico (Figura 2.19) que auxiliou na obtenção da relação descrita pela equação 2.2.

**Figura 2.19** é Gráfico que relaciona o número de Mohs com a dureza vickers [kgf/mm<sup>2</sup>]



Fonte: Adaptado de TABOR (1959).

$$\log \left( \frac{H}{H_0} \right) = \log k_1 \cdot M \quad \text{Equação (2.2)}$$

Onde:

H: é a dureza [N/mm<sup>2</sup>];

H<sub>0</sub>: é uma cte [N/mm<sup>2</sup>] e;

M: número Mohs.

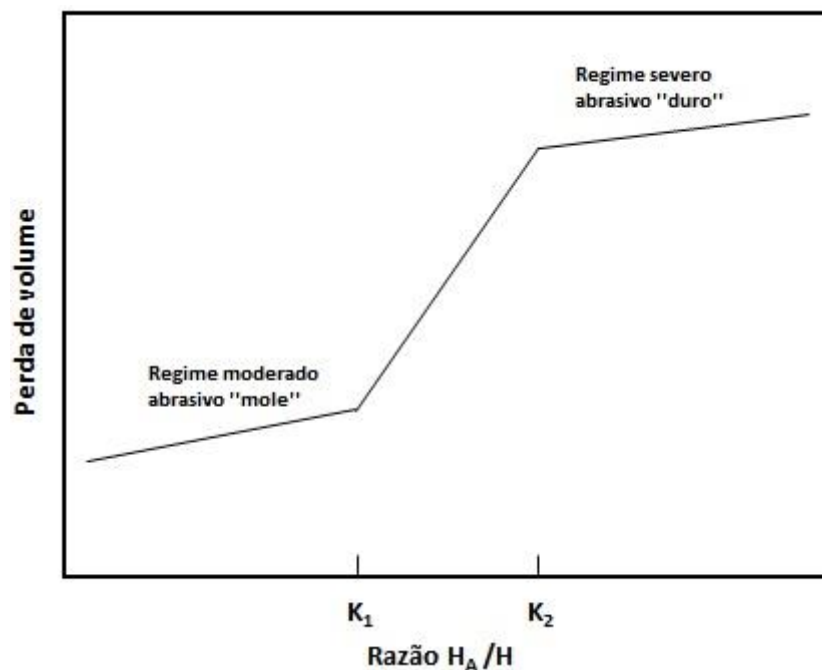
K<sub>1</sub>: Relação de dureza Vickers ó Relação entre a dureza e sua subsequente na escala Mohs.

Calculando a relação aplicando-se a equação 2.2 obteve-se regularmente um valor próximo de 1,6. Outros autores obtiveram resultados bem próximos. Gonçalves (2000), por exemplo, determinou a relação por meio de ensaios de esclerometria linear e obteve como resultado K<sub>1</sub> = 1,8.

Essa relação  $K_1$  ou  $(H/H_0)$  é utilizada para determinar a severidade para o desgaste abrasivo em materiais monofásicos, sendo que o intervalo entre 0,7 e 1,1 (com limite entre as zonas 1,2) seria do tipo "regime moderado" e o intervalo acima de 1,2 estaria relacionado com "regime severo", conforme aponta Kruschov (1957). Outro autor que contribuiu para a pesquisa foi Richardson (1968) que apresentou os intervalos de início e fim dos regimes e sua transição. No entanto, a razão  $(H/H_0)$  pode ser limitada nos casos que os abrasivos são heterogêneos (PINTAÚDE, 2001).

A figura 2.20 transcreve a curva de severidade em um mecanismo sujeito ao desgaste, correlacionando a dureza dos materiais submetidos ao mecanismo:  $H_A$  ó dureza do abrasivo e  $H$  ó dureza do material a ser desgastado, analisando a relação em função da perda de volume durante o processo. A relação  $H_A/H$  define o intervalo de início e fim da transição dos regimes, " $K_1$ " e " $K_2$ ". Observando o gráfico, é possível constatar que a dureza do abrasivo influencia na perda de volume, conseqüentemente, na severidade do mecanismo.

**Figura 2.20** ó Relação que define os regimes de severidade.



Fonte: KRUSCHOV (1957).

O trabalho mencionado viabilizou diversos pesquisadores a desenvolverem alguns pressupostos. Zum Gahr (1987) definiu que um abrasivo "duro" é aquele que possui 20% de dureza maior do que a superfície desgastada ou 50% maior que a dureza

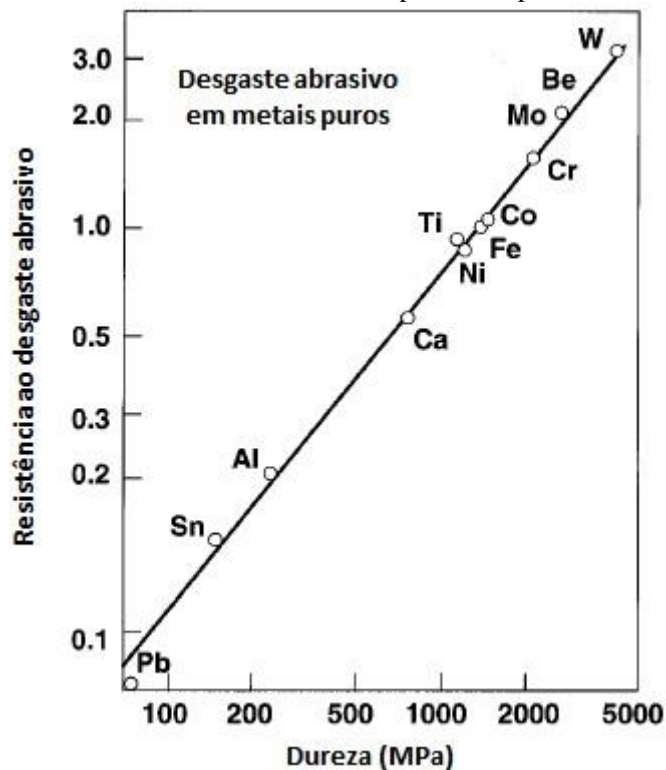


prévia do processo de desgaste. Hutchings (1992) definiu que a relação entre a dureza da superfície desgastada ( $H_s$ ) e o abrasivo ( $H_a$ ) influencia significativamente na taxa de desgaste.

Entretanto, como já visto anteriormente, trata-se de um sistema complexo, dependente de  $n$  variáveis. Dessa maneira, para se definir o regime de severidade predominante durante o processo de desgaste é necessária uma análise de todos os parâmetros que o circundam, todavia, é evidenciada uma relação entre a dureza das partículas e a taxa do desgaste. Alguns trabalhos disponíveis na literatura com contribuições para a discussão serão abordados.

Rabinowicz (1983) utilizando resultados obtidos por pesquisas realizadas por Khrushov (1957), demonstra a influência da dureza de diversos metais puros em relação à resistência ao desgaste (figura 2.21). O autor propõe que a resistência ao desgaste abrasivo é linearmente proporcional à dureza de metais desgastados. Esse preposto condiz com o efeito produzido no experimento e confirma o pressuposto estabelecido pela equação 2.1 (KATO; ADACHI, 2001).

**Figura 2.21** Influência da dureza na resistência ao desgaste abrasivo de diversos metais puros, submetidos à abrasão do tipo dois corpos.



Fonte: Adaptado de KHRUSCHOV (1957) *apud* KATO; ADACHI (2001).

Khruscov (1974) menciona que o desgaste depende de outros fatores, não somente da correlação entre dureza do abrasivo e da superfície de desgaste. Segundo o autor, o mecanismo de desgaste vai depender também da natureza da partícula, forma, tamanho, resistência, etc.

Moore e King (1980) afirmam que para a determinação do regime de desgaste a dureza é o fator mais importante, uma vez que, para esses autores, dureza é impactante na deterioração das partículas abrasivas durante o mecanismo, e, conseqüentemente tem efeitos sob a geometria das partículas e no tipo de contato.

Analisando as afirmativas feitas por Moore *et al* (1980) e Khruscov (1974) acima mencionadas e incorporando diversos trabalhos encontrados no acervo literário, nota-se que o fator dureza do abrasivo do material a ser desgastando (H) ou a relação entre eles ( $H_A/H$ ) é relevante para prever a severidade do mecanismo de desgaste.

## 2.4. TRIBÔMETROS

A ciência dos materiais é extremamente exigida pela competitividade industrial, visto que, ao longo dos tempos, verifica-se o desenvolvimento de novas tecnologias, tornando processos cada vez mais eficientes e desenvolvendo materiais que atendam às especificações. Em meio a esse contexto, o estudo de materiais e suas propriedades ao nível atômico-molecular vem ganhando aliados. Diante dessa contextualização, surge a necessidade de simular diversos materiais e processos sob inúmeras condições, objetivando obter a máxima eficiência possível.

A tribologia, assim como nas diversas áreas que incorporam a ciência dos materiais, vem buscando reproduzir condições de materiais em sua aplicação ou até mesmo determinar propriedades dos materiais mediante a realização de ensaios padronizados. Essas condições mencionadas caracterizam o sistema tribológico, resultado da atuação de diversos elementos constituintes, portanto, para se iniciar uma simulação da condição de um componente submetido ao mecanismo de desgaste é necessário identificar os elementos e, a partir daí, quantificá-los, analisando a influência sob o sistema.

As condições dos mecanismos de desgaste podem ser simuladas aplicando-se diversos meios, tais como: modelos matemáticos, utilização de softwares e ensaios físicos. Normas regulamentadoras são aplicáveis em simulações de ensaios físicos, como a ASTM, objetivando padronizar as condições supramencionadas.

A figura 2.22 cita diversos atributos relacionados ao desgaste que devem ser considerados importantes para a simulação e menciona algumas categorias de elementos importantes e os seus aspectos relevantes (BAYER, 2004).

**Figura 2.22** - Atributos relacionados ao desgaste importantes para a simulação.

<b>CATEGORIA</b>	<b>ASPECTOS RELEVANTES</b>
Materiais	Composição química, condições de processamento, preparação da superfície, grau de pureza, revestimento, espessura.
Geometria	Tipo de área de contato, tamanho, rugosidade
Movimento	Rolamento, deslizamento ou impacto, direções, oscilações.
Carregamento	Constante, impacto, tensões de contato, uniformidade.
Lubrificação	lubrificado ou não, tipo de lubrificante, a composição e as propriedades do lubrificante, quantidade,
Meio ambiente	Temperatura, umidade relativa, composição dos gases e partículas ou características do fluido.
Dissipação e geração de calor	Condução de calor, fontes de calor, temperatura de superfície, espessura do material

. Fonte: Adaptado de BAYER (2004).

Bayer (2004) analisa e classifica os ensaios de desgaste em duas categorias: os ensaios do tipo fenomenológicos e ensaios de desgaste operacionais.

Os ensaios fenomenológicos são atribuídos ao estudo de um fenômeno ou condição geral, como, por exemplo, o desgaste por deslizamento ou erosão. Tais ensaios tendem para fornecer informações ambíguas de tal maneira que, para se estabelecer uma correlação com situações operacionais, seriam necessárias informações adicionais, a análise de falha dos componentes desgastados é um exemplo disso. Os ensaios de desgaste operacionais se concentram em investigar aplicações ou situações específicas. De acordo com o autor, os pesquisadores tendem a se enquadrar na categoria de ensaios fenomenológicos (BAYER, 2004).

Apresentados os atributos importantes para o ensaio de desgaste, o próximo passo é expor alguns equipamentos utilizados para ensaios.

#### **2.4.1. Ensaio de desgaste**

Condigno ao impacto gerado em especial no segmento industrial, pesquisadores aliados com interesses industriais vêm buscando opções para maximizar a produção otimizando falhas em todo o processo. A pesquisa dar-se-á desde o estudo de aprimoramento de propriedades de materiais existentes e aplicáveis à resistência ao desgaste, à aplicação de um elemento sob a superfície, seja ele um filme ou um material de sacrifício, um lubrificante em diversos estados da matéria, ou, por meio de modelagens matemáticas (simulações utilizando-se das ferramentas computacionais), ou até mesmo as simulações experimentais, utilizando-se tribômetros disponíveis no mercado, que também estão sendo montados e projetados para tal estudo.

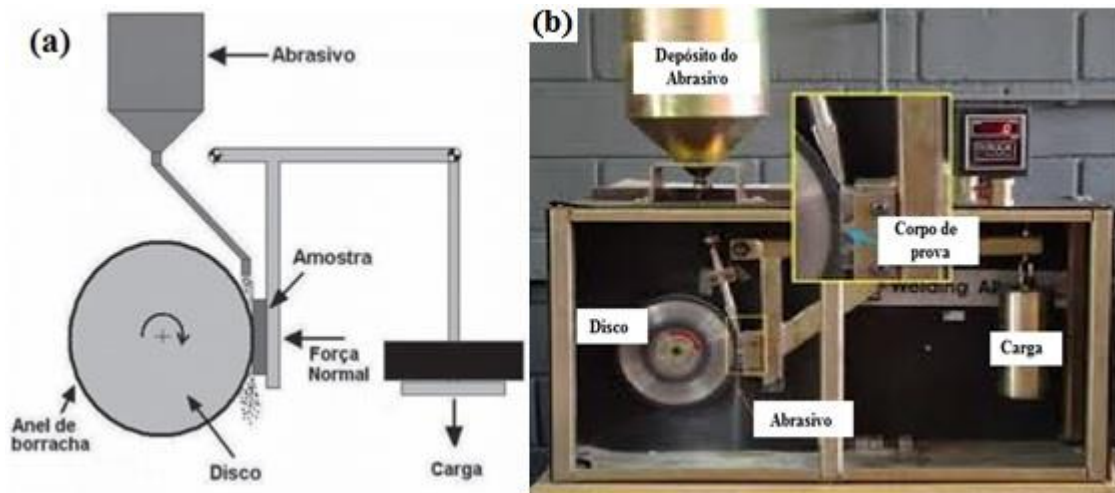
Na literatura é possível encontrar diversos dispositivos que são utilizados para avaliar o mecanismo de desgaste sob diversas condições. Devido a isso, neste tópico alguns dispositivos serão apresentados sucintamente, lembrando que serão apresentados alguns dispositivos empregados para o estudo do desgaste abrasivo, uma vez que, é o objeto da pesquisa.

##### **2.4.1.1. Abrasômetro Roda de Borracha condição à seco.**

Em 1948, Haworth apresentou o abrasômetro tipo roda de borracha constituído por um disco de aço, envolvido com um anel de borracha que girava em contato com a superfície do corpo de prova, com o abrasivo na interface. O ensaio pode ser realizado sob duas condições: a seco ou a úmido, segundo Lima (2008).

O teste foi desenvolvido para simular condições de desgaste abrasivo sob baixa tensão. O dispositivo constitui-se de uma roda metálica pressionada por uma carga  $F_0$  recoberta com borracha em que geralmente é utilizada areia como abrasivo e um controlador de velocidade, com finalidade de conservá-la constante. O princípio de funcionamento desse dispositivo consiste no desgaste associado a grãos abrasivos de granulometria controlada soltos arrastados sob a superfície, provocando o riscamento, conforme a American Society for Testing and Materials (ASTM G 65-00, 2001) (Figura 2.23).

**Figura 2.23** - Esquema do abrasômetro Roda de Borracha á seco.



Onde: (a) Esquema do abrasômetro Roda de Borracha à seco exibindo todos os componentes e (b) o equipamento utilizado nos ensaios.

Fonte: Adaptado de VINÍCIUS *et al* ( 2009).

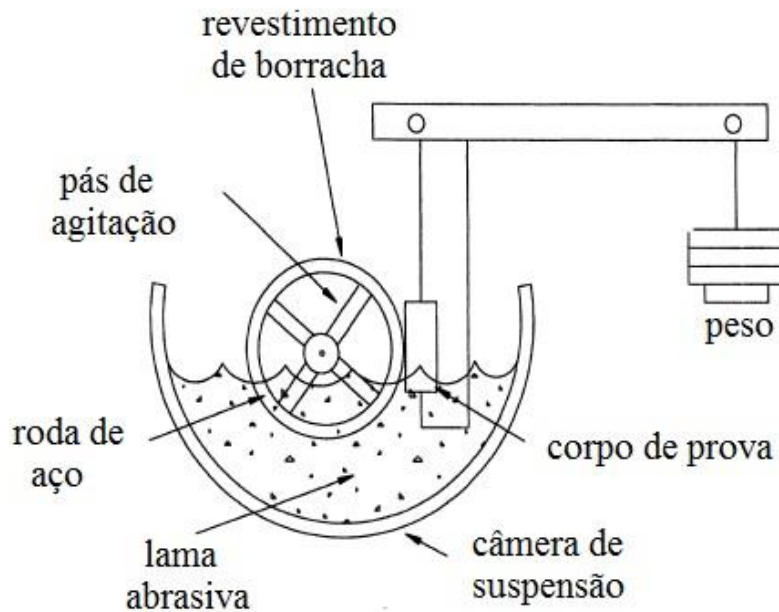
#### 2.4.1.2. Abrasômetro Roda de Borracha condição úmida

O teste nesse dispositivo é semelhante ao descrito na condição seca, utilizando a roda de borracha para arrastar o abrasivo na superfície do material especificado, porém, nesse caso as partículas abrasivas estão sob o aspecto de lama.

Segundo Bayer (2004), os resultados dos ensaios não sofrem alterações significativas e a norma ASTM G105 que reproduz o teste sob as duas condições obtêm um coeficiente de variação entre os ensaios de aproximadamente 5%, no entanto, o autor menciona que para que a reprodutibilidade entre os diferentes dispositivos apresente uma variação satisfatória, todas as etapas descritas na norma devem ser bem controladas e conduzidas corretamente.

Para o dispositivo utilizado no procedimento via seca, é importante o controle da alimentação de abrasivos no sistema, enquanto que para a condição úmida é necessário definir no ensaio a composição da lama através da seleção do abrasivo (definindo tipo, tamanho e origem) e da água (quantidade e tipo). Nos ensaios realizados na condição úmida no dispositivo é importante ressaltar que materiais com características magnéticas devem ser desmagnetizados. A figura 2.24 apresenta um esquema do dispositivo do tipo roda de borracha em condições; úmida.

**Figura 2.24** 6 Esquema do abrasômetro Roda de Borracha em condição úmido.



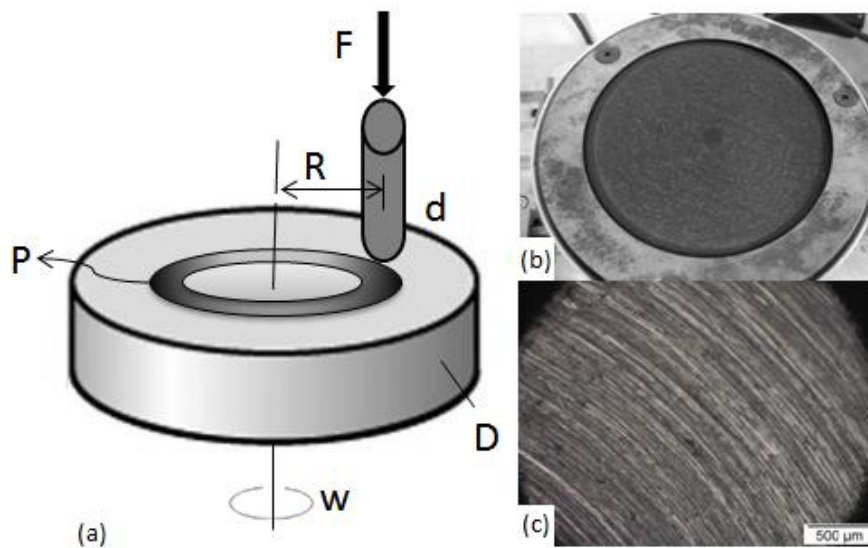
Fonte: BAYER (2004).

### 2.4.1.3. Pino-disco

O ensaio pino-disco é um dispositivo no qual um pino sob a ação de uma carga normal aplicada é forçado contra a superfície de um disco em movimento circular permanente. Ao longo do movimento de rotação é observado o aparecimento de uma pista circular oriunda do desgaste, justificada como resultado da aplicação da carga sobre o pino. O ensaio também pode decorrer com o pino efetuando o movimento de rotação enquanto o disco permanece parado.

Durante o ensaio é obtido como resultado uma medida da perda de massa do corpo de prova ao longo do tempo, medida essa obtida comparando massa inicial e final do material desgastado. Com os resultados obtidos é possível determinar a distância percorrida, coeficiente de desgaste, resistência ao desgaste. A norma ASTM G99 ó 05 faz referências sobre o ensaio e auxilia na determinação dos parâmetros mencionados anteriormente. A figura 2.25 expõe: (a) o esquema do sistema pino-disco, (b) o abrasivo fixado e (c) a micrografia do abrasivo após o ensaio. A imagem (a) exhibe os parâmetros do sistema pino-disco, onde se designa que: **F**, é a força normal sobre o pino, **d** é o diâmetro do pino ou esfera, **D** é o diâmetro do disco, **R** é o raio da pista de desgaste, **W** é a velocidade de rotação do disco e **P** é o caminho percorrido pelo pino sob o disco onde houve o desgaste, ou seja, a perda de material.

**Figura 2.25** 6 Ilustração e imagens do sistema pino-disco.



Onde: (a) esquema do sistema de teste de desgaste pino-disco (ASTM G99-2010). (b) abrasivo fixado no dispositivo, verificando o caminho percorrido. (c) micrografia da superfície do aço Hadfield após o ensaio de desgaste executado no dispositivo pino-disco.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Diversas condições podem ser simuladas no ensaio já que diversos parâmetros podem ser alterados para a execução do experimento, tais como: velocidade do movimento de rotação ou do movimento linear de avanço do conjunto, carga aplicada sob o sistema, percurso total do ensaio (quantas voltas foram programadas) e presença ou ausência de lubrificação.

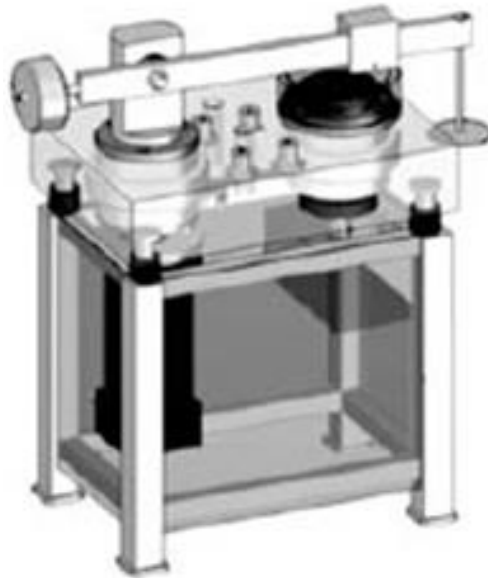
O aumento da velocidade de deslizamento segundo Wainer *et al* (1992), conseqüentemente, gera o aumento no volume de material removido por abrasão. Este fato, segundo o autor, é atribuído ao aquecimento da superfície provocada pelo atrito das partículas abrasivas, no qual há diminuição das propriedades mecânicas do material.

O desgaste, ou melhor, a perda de material por abrasão no ensaio está diretamente relacionada com a força de compressão entre abrasivo e superfície, gerado pela carga aplicada no sistema, com o aumento do esforço ocasionado pela carga sob o material tendência um aumento do desgaste abrasivo, como descrito anteriormente no trabalho. Contudo, essa proporcionalidade é aplicável até o valor crítico de força, onde o material passa a fraturar.

No acervo literário é possível encontrar trabalhos que consistem na montagem de um dispositivo pino contra disco. A figura 2.26, por exemplo, exhibe um projeto de designer do protótipo montado por alunos da engenharia da USP. (RAMOS *et. al.*, 2015). Outros trabalhos como de Villabón, Sinatora (2006); Zavaglia *et. al.* (2009);

Verdi (2011); Henanz (2014) corroboraram para a continuidade do desenvolvimento de pesquisas.

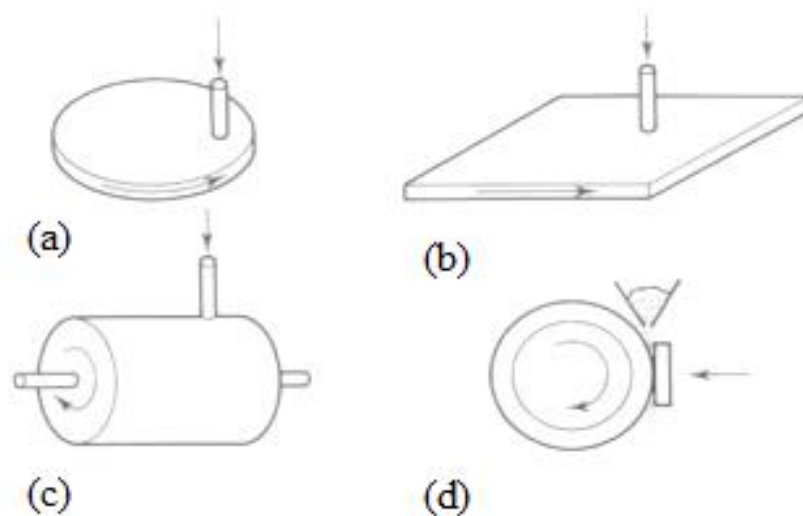
**Figura 2.26** - Protótipo virtual do equipamento utilizando *solid Edge*.



Fonte: RAMOS *et. al.* ( 2015).

No livro de Hutchings (1992), o autor exibe no desenho esquematizado três diferentes métodos utilizados para determinar a taxa de desgaste utilizando pino em contato com uma superfície: disco, tambor e placa e o dispositivo de roda de borracha. Nos três métodos mencionados acima o princípio físico não se altera. (Figura 2.27).

**Figura 2.27** - Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo



Onde: (a) Pino sobre disco, (b) Pino sobre placa, (c) pino sobre tambor e (d) roda de borracha HUTCHINGS (1992).

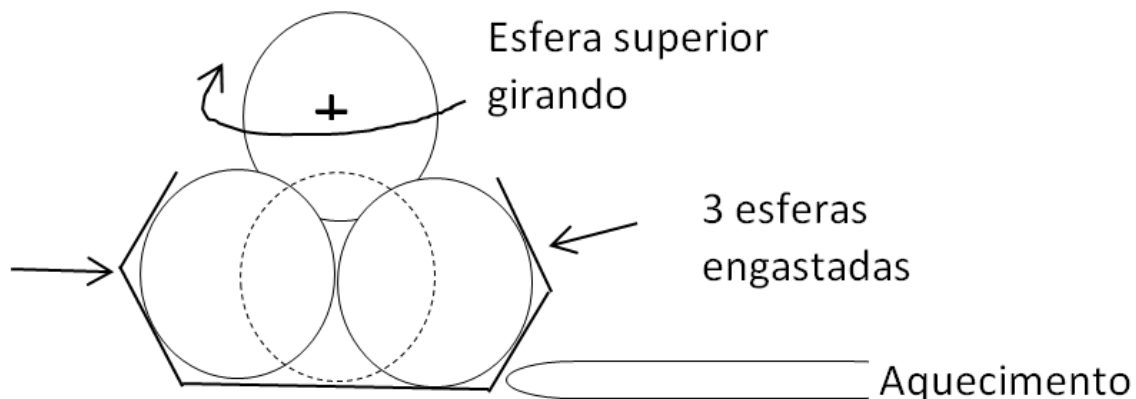


#### 2.4.1.4. Outros dispositivos

- **Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas**

O princípio para o ensaio consiste em avaliar a resposta de um sistema onde três esferas cobertas por lubrificante com diâmetros de 12,7 mm são engastadas, posteriormente, uma quarta esfera é inserida no topo das esferas e pressionada na cavidade das esferas engastadas e após o aquecimento do lubrificante a esfera do topo provoca o efeito de cisalhamento entre as quatro esferas ao serem giradas, resultando em depressões nas esferas engastadas (Figura 2.28). Conforme a norma que estabelece o procedimento (ASTM D4172), o ensaio tem como objetivo determinar as propriedades do lubrificante submetido a superfícies que deslizam entre si. Depois de realizado o ensaio, o diâmetro das depressões provocadas será analisado. (BAYER, 2004).

**Figura 2.28** - Esquema ilustrativo do ensaio de desgaste de quatro esferas.

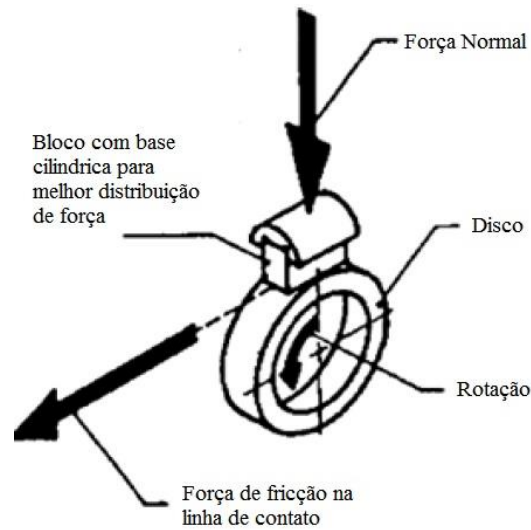


FONTE: Adaptado de BAYER (2004).

- **Ensaio de Desgaste Bloco-Disco**

O princípio para o ensaio consiste em avaliar a resposta de um sistema no qual um bloco de teste é pressionado contra um disco sob movimento rotacional com finalidade de obter o volume desgastado provocado no sistema, seja pela perda de volume do bloco ou pelo disco (Figura 2.29). A ASTM G77 é a norma aplicável ao ensaio.

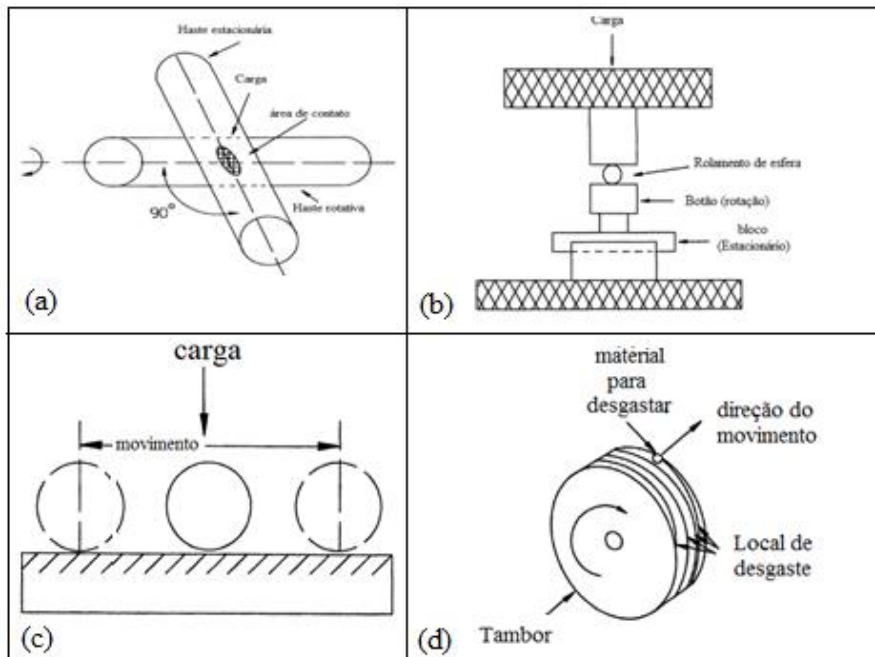
Figura 2.29 - Esquema ilustrativo do ensaio de análise de desgaste do tipo bloco-disco (ASTM G77).



Fonte: BAYER (2004).

O autor menciona outros testes que também podem ser aplicáveis para a análise de desgaste em um sistema: (a) cilindro cruzado (ASTM G-83); (c) desgaste por resistência a escoriação (ASTM G-98); (d) pino no plano (ASTM G-133); (e) teste de desgaste de cilindro (ASTM G-56) entre outros. A figura 2.30 exibe os esquemas ilustrativos dos ensaios mencionados (BAYER, 2004).

Figura 2.30 6 Esquema ilustrativo dos diversos testes para desgaste.



Onde: (a) Cilindro cruzado, (b) desgaste por resistência a escoriação, (c) pino no plano, (d) teste de desgaste de cilindro.

Fonte: BAYER (2004).

## 2.5. AÇO HADFIELD

### 2.5.1 - O aço e suas particularidades

O aço Hadfield surgiu em 1882, inventado por Robert Hadfield. É um aço austenítico manganês, em média em sua composição contém cerca de 1,2% C e 12% Mn. Devido a suas características mecânicas, o aço é amplamente utilizado em componentes mecânicos submetidos à abrasão e impacto, portanto, é amplamente empregado em setores como: pedreiras, terraplenagem, minas, siderurgia, perfuração de petróleo, equipamentos de processamento e manuseio de materiais (dentes de escavadoras, britadores, moinhos de trituração, martelos de fragmentação etc.).

Segundo Rocha *et al.* (2009), o aço Hadfield apresenta baixa resistência, alta ductilidade e microestrutura que consiste de austenita metaestável. Destaca-se também a habilidade de encruamento que é de extrema importância nesse material, pois, de uma dureza inicial de 240 HB atinge, aproximadamente, 500 HB. O aço é normatizado pela ASTM A128 que os classifica conforme seus elementos químicos constituintes.

**Figura 2.31** ó Tabela apresentando as classes do aço Hadfield.

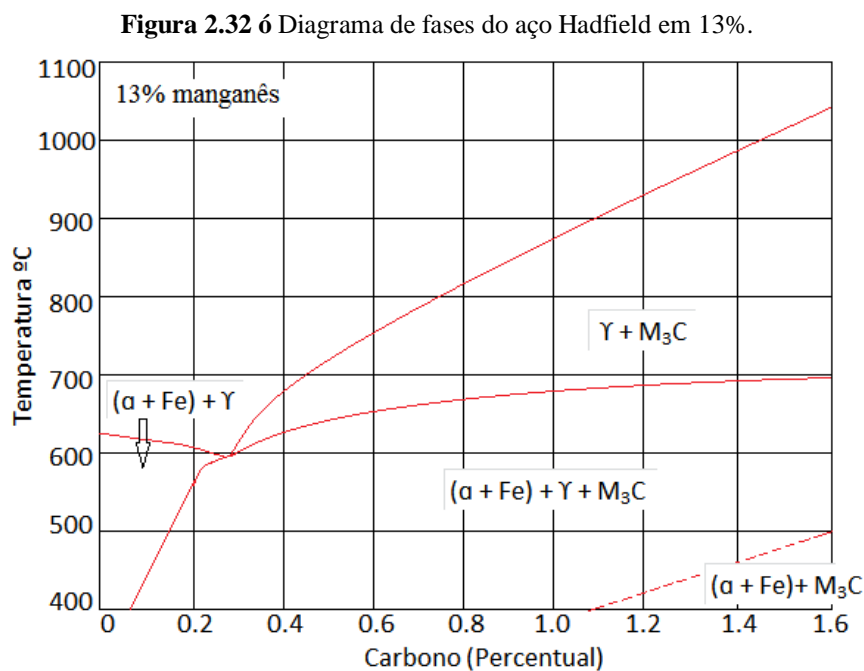
Classe <sup>A</sup>	Composição, %						
	Carbono	Manganês	Cromo	Molibdênio	Níquel	Silício	Fósforo
A <sup>B</sup>	1.05–1.35	11.0 min	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-1	0.9 –1.05	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-2	1.05–1.2	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-3	1.12–1.28	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-4	1.2 –1.35	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
C	1.05–1.35	11.5–14.0	1.5–2.5	...	...	1.00 max	0.07 max
D	0.7 –1.3	11.5–14.0	...	...	3.0–4.0	1.00 max	0.07 max
E-1	0.7 –1.3	11.5–14.0	...	0.9–1.2	...	1.00 max	0.07 max
E-2	1.05–1.45	11.5–14.0	...	1.8–2.1	...	1.00 max	0.07 max
F (J91340)	1.05–1.35	6.0–8.0	...	0.9–1.2	...	1.00 max	0.07 max

Fonte: ASTM A 128 (2012).

O aço apresenta a estrutura cúbica de face centrada (CFC), quatro planos e seis direções, ou seja, possui 24 sistemas de deslizamento. É possível ocorrer a alteração da estrutura cristalina do aço. Segundo Neves (2004), esse fato deve-se a uma transformação induzida por deformação para (CCC), quando o aço modifica sua fase (austenita para martenista). Dependendo dos teores de C e Mn, a modificação da fase pode ou não apresentar efeitos para a resposta do material quando submetido a esforços que gerem desgaste.

De acordo com Neves (2004), o aço manganês austenítico é produzido pelo processo de fusão em fornos elétricos (AVERY (1961) *apud* NEVES (2004)). O tratamento térmico comumente empregado no aço manganês fundido dar-se-á pelo aquecimento lento (média de 1 a 2 horas por polegada de espessura) à temperatura aproximada de 1010 a 1100°C e resfriado em água. Segundo CHIPMAN (1964) *apud* NEVES (2004), durante o encharque, ou seja, o tempo de permanência do aço para que toda sua estrutura adquira a temperatura desejada, existe a possibilidade de ocorrer o crescimento dos grãos da austenita. O autor ainda menciona que o tamanho final dos grãos da austenita é determinado pela temperatura do aço no vazamento e velocidade de solidificação.

A figura 2.32 exibe o diagrama de fases para o aço Hadfield, contendo 13% de manganês em sua composição. Segundo Chiaverini (1988), pela análise do diagrama é possível observar que o ponto eutetóide do aço é caracterizado por apresentar baixos teores de carbono e que nem mesmo em velocidades moderadas de esfriamento a austenita não se transforma devido sua estabilidade.



Fonte: ASM Handbook (2004).

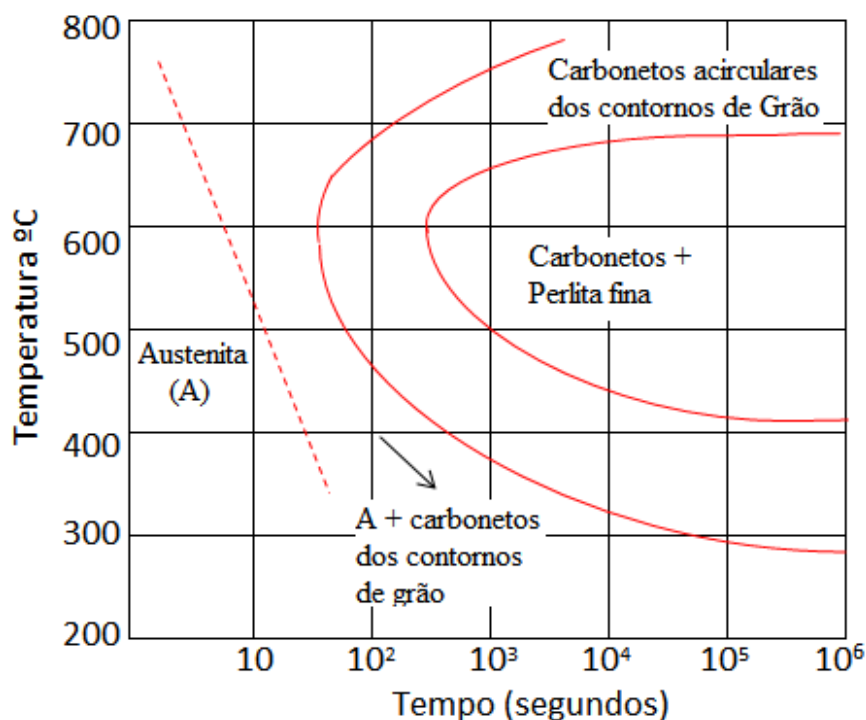
Tressia (2015) menciona que diversos autores sugerem respostas para as possíveis causas da elevada capacidade de endurecimento do aço Hadfield, quando submetido a impacto ou abrasão em condições de trabalho. Segundo o autor, os pesquisadores Jost e Schmidt (1986); Zum-Gahr (1987) descrevem que o fenômeno é

consequente da movimentação dos átomos intersticiais de carbono que movem-se para os defeitos. Para Adler *et al.* (1986); Vatajuk e Goldenstein (1987); Atabaki *et al.* (2012); ocorre o bloqueio do movimento das discordâncias devido a formação de maclas de deformação, que atuam como barreiras, similar ao fenômeno do refino de grão. Enquanto Bhattacharyya (1966); Jost e Schmidt (1986); Zum-Gahr (1987) símile ao efeito a mudança de fases de austenita para martensita.

Segundo KUYUCAK (2001) *apud* MACHADO (2015), o aço Hadfield em seu estado bruto de fusão contém precipitados em sua matriz austenítica. Após sua solidificação para otimizar partículas secundárias e uma segunda fase do contorno de grão, o metal é submetido a um tratamento térmico de solubilização a 1150 °C e, em seguida, aplica-se uma têmpera em água agitada. O autor define que esse processo tem por finalidade a obtenção de uma solução sólida supersaturada, ou seja, uma concentração de soluto dispersa na matriz, o que seria para o autor, a ausência de carboneto no grão livre.

Para aumentar a resistência ao desgaste no aço Hadfield, conforme Kuyucak (2001) citado por Machado (2015), adicionam-se alguns metais, como o cromo, no entanto, o elemento restringe a eficiência da têmpera, podendo ser observado no deslocamento para a esquerda na curva (TTT), conforme a figura 2.33.

**Figura 2.33** - Diagrama TTT -temperatura-tempo-transformaçãoo do aço manganês, 13% Mn.



Fonte: Adaptado de KUYUCAK (2001) *apud* MACHADO (2015).

Pelo diagrama apresentado na figura 2.33, a curva da transformação isotérmica (TTT) de um aço Hadfield pode apresentar os possíveis problemas:

- A dissolução incompleta de carbonetos ó A perda de tenacidade à fratura é a principal causa de carbonetos contínuos presentes no material e para que sejam dissolvidos pela matriz, o patamar do TTT deve ser atingido.
- A taxa de resfriamento deve ser suficiente para impedir que os carbonetos dissolvidos durante a solubilização venham a se reprecipitarem.

De acordo com Neves (2004), o carbono e o manganês contribuem substancialmente para as propriedades mecânicas do aço Hadfield. O autor destaca a influência do C e Mn. Na resistência à tração e ductilidade, por exemplo, ainda menciona sobre a formação da martensita induzida por deformação, simplesmente controlando os teores dos elementos mencionados, aumentando o encruamento e ainda assim, mantém-se inalterado o desgaste do aço para altas tensões abrasivas.

Considerando o aço Hadfield com diferentes teores de Mn (1,1% e 13%) e analisando a transformação isotérmica a uma temperatura de 370°C, é possível observar que o início da transformação para o aço contendo menor teor de Mn seria imediato, não ultrapassando um tempo estimado de 15 segundos após o aço ser resfriado, enquanto que, para o aço contendo 13% de Mg, a transformação sob a mesma temperatura enceta 48 horas após o fim do processo de resfriamento (NEVES, 2004).

## **2.5.2 - A influência dos elementos constituintes**

### **2.5.2.1. A influência do Carbono**

De acordo com Rocha (2011, *apud* Avery, 1954), no aço Hadfield um baixo teor de carbono evita a redução da resistência à tração e à ductilidade, consequência da dificuldade em manter todo o carbono em solução sólida. Segundo o autor, para que a porcentagem ideal de carbono fique em torno de 10% da porcentagem de manganês, sugere-se utilizar 1,2%. Enquanto teores superiores a 1,4 % seriam prejudiciais à resistência mecânica e ductilidade, devido à dificuldade de se ter estrutura livre de carbonetos nos contornos de grãos.

### 2.5.2.2. A influência do Manganês

O manganês atua como estabilizante da austenita, retardando sua transformação. Segundo Avery (1949), conforme citado por Rocha (2011) existem limites do elemento que influenciam nas propriedades do aço Hadfield. Teores inferiores a 10% reduzem bruscamente propriedades de resistência. O autor menciona que entre os limites de 10 a 14%, os efeitos sobre o limite de escoamento são mínimos, enquanto que a ductilidade e limite de resistência à tração apresentam benefícios, estabilizando em teores próximos de 12%. O intervalo de [11% a 20%] é o teor sugerido pelo autor.

### 2.5.2.3. Influência de outros elementos de liga

No aço manganês é possível encontrar outros constituintes tais como: cromo, níquel, molibdênio, vanádio, titânio e bismuto, silício, fósforo, etc.

O cromo aumenta a resistência à corrosão por desgaste, dificulta o processo de solubilização, exigindo maiores tempos e temperatura para o tratamento devido a formação de carbonetos. O autor descreve que o molibdênio influencia no aumento do limite de escoamento, conseqüentemente, é possível reduzir o teor de carbono sem a redução da resistência mecânica. O molibdênio ainda pode atrasar o tempo da formação de carbonetos durante o resfriamento após o tratamento térmico, auxiliando na temperabilidade do material (ROCHA, 2011 *apud* AVERY, 1949).

O fósforo utilizado em pequenas quantidades previne trincas, o titânio atua neutralizando os efeitos do fósforo e atua como refinador de grãos (baixo teor) enquanto que em altos teores reduz ductilidade e reduz efeitos de corrosão intergranular em aços austeníticos. No silício, o limite do elemento contido no aço é fixado em um intervalo de 1% a 2%, podendo o aço nesse intervalo apresentar um aumento moderado no limite e resistência de escoamento sob repetitiva ação de impacto. Teores acima de 2%, de acordo com o autor, podem gerar redução na ductilidade e resistência à tração (ROCHA, 2011 *apud* AVERY, 1949).

### 2.5.3 ó Desgaste abrasivo no aço Hadfield

Neste tópico serão abordados trabalhos disponíveis na literatura referentes ao comportamento do aço Hadfield quando submetido ao desgaste abrasivo.

Jost e Schmidt (1986) exibem em seu trabalho uma relação entre microdureza e desgaste abrasivo em aço Hadfield com diferentes teores de manganês submetidos ao ensaio do tipo pino-disco. Os autores observaram nos resultados que em teores de manganês (4% e 6%) apresentam maior resistência ao desgaste, associada a microdureza do aço, enquanto que maiores teores (8% e 12%) de manganês apresentaram menor resistência ao desgaste, consequência, da menor microdureza apresentada pelos materiais .

Zum-Gahr (1987) constatou em resultados obtidos em seus experimentos que durante o ensaio de abrasão (dois corpos) a microestrutura do aço Hadfield é modificada de acordo com o teor de manganês presente no aço. De acordo com o autor, nos aços contendo 6% de manganês, em cerca de 92% da sua superfície desgastada ocorreu a transformação de fase, mudança que modificou a microestrutura austenítica para martensítica, enquanto que para teores de 12% de manganês, em apenas 5% da superfície ocorreu a transformação.

Abbasi *et al.* (2010), em seus experimentos, constatou a influência da carga aplicada na resistência do aço Hadfield, submetido ao ensaio de dois corpos. O autor observou que a perda de massa inicial foi elevada, ocasionando deformação plástica. Em seguida, verificou a redução do desgaste que provavelmente ocorreu devido ao endurecimento da superfície inicial observada.

Atabaki *et al.* (2012) observaram o aumento da dureza da superfície desgastada do aço Hadfield de aproximadamente 1,8 vezes em relação a dureza inicial do aço submetidos a ensaios do tipo pino-disco e esse aumento, conseqüentemente, gerou maior resistência ao desgaste abrasivo durante o ensaio.

Tressia (2015) avaliou o comportamento de desgaste abrasivo do aço Hadfield em relação aos efeitos do tamanho do abrasivo e pH do meio. O autor nos resultados experimentais observou que a perda de massa aumenta linearmente, porém a intensidade reduz quando atinge um tamanho crítico de abrasivo (TCA) e paralelo a esse efeito foi observado que o aumento do abrasivo produzia um aumento de dureza do aço. Quanto ao pH, o aumento resultou em menores perdas de massa, sendo este efeito maior para os dois menores tamanhos de abrasivo.



## CAPÍTULO III

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e metodologias utilizados na pesquisa, sendo apresentada a montagem do dispositivo, os tipos de materiais utilizados, a descrição do ensaio, parâmetros avaliados que influenciam no ensaio, ensaios de microdureza no aço Hadfield e técnicas para caracterização da superfície, obtidos através de análises microscópicas.

A metodologia empregada no estudo foi dividida em três etapas: A primeira descreve a montagem do equipamento e compara os resultados obtidos em ensaios realizados em outra instituição de ensino. A segunda etapa consiste na análise de parâmetros de influência nos ensaios e a terceira fase consiste em avaliar o comportamento do aço Hadfield no equipamento e confrontar com resultados da USP.

#### 3.1. MONTAGEM DO DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

O dispositivo do tipo pino-disco foi montado no laboratório de Materiais Compósitos, e Integridade Estrutural - CompoLab, DEMEC/UFPE. O Laboratório de Fenômenos de Superfície LFS-USP disponibilizou um dispositivo do tipo pino-disco desativado, composto por dois motores, um painel de comando e um suporte para fixar o pino.

O equipamento foi montado sob a bancada, conforme demonstra a figura 3.1. O dispositivo foi constituído por um eixo com rosca para acoplar o contra peso; um dispositivo para acoplar o corpo de prova (pino); carrinho do disco; um circuito de comando; dois motores individuais, um acoplado ao sistema do movimento linear do eixo do carrinho do disco, e outro direcionado para o movimento rotacional do disco.

**Figura 3.16** Dispositivo para estudo de desgaste do tipo pino no disco e seus componentes.

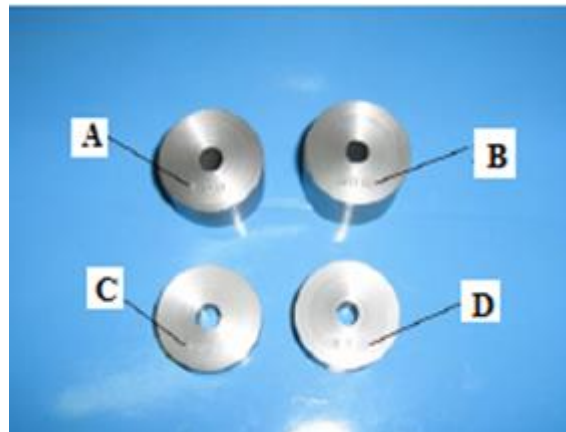


Fonte: Acervo Pessoal (2016).

Após a montagem do dispositivo e definido o processo experimental, alguns ajustes no dispositivo e fabricação de componentes fizeram-se necessários.

A figura 3.2 exibe a imagem ilustrativa de anilhas de aço inox AISI 304, usinadas com massa padronizada para serem utilizadas como cargas durante os ensaios.

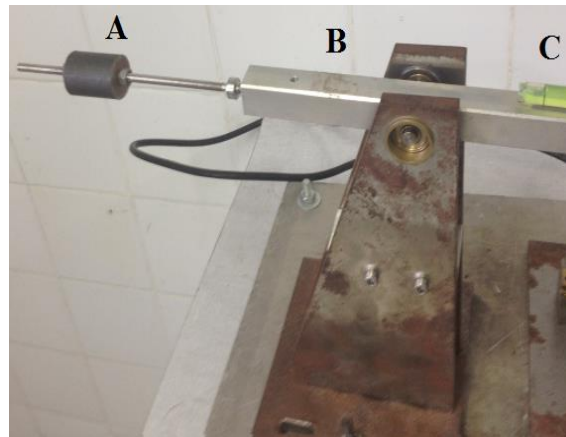
**Figura 3.26** Cargas confeccionadas em aço inox AISI 304.



Onde: (a) 4,6N, (b) 2,0 N (c) 1,0 N, (d) 0,5N.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

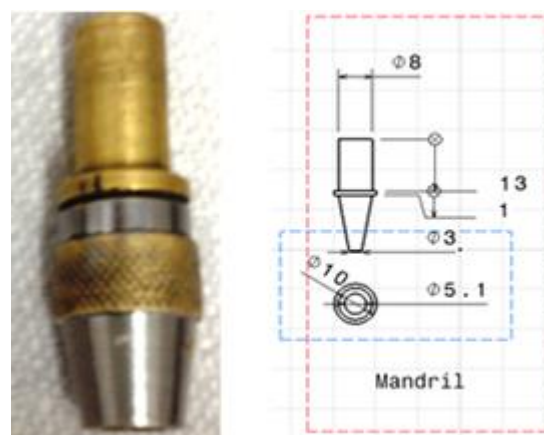
Devido ao peso exercido sobre o braço no conjunto pino-lixia foi preciso calcular o peso necessário para o nivelamento do eixo do mancal, onde se fixa o pino (corpo de prova) para a confecção da carga de nivelamento, (contra-peso), conforme a figura 3.3.

**Figura 3.36** Mancal de fixação do pino.

Onde: (A) Contra-peso (B) Braço que acopla o pino (C) nível.

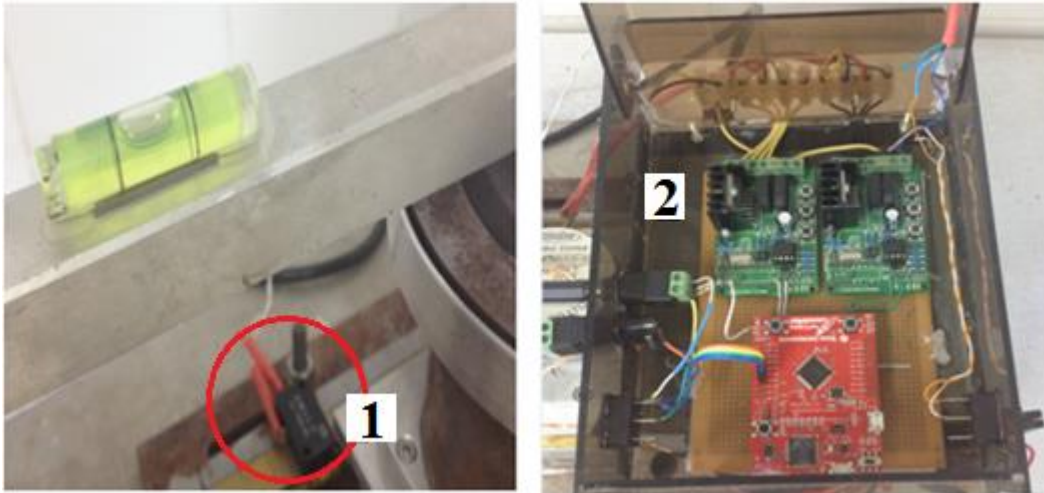
Fonte: Acervo pessoal (2016).

Para fixação dos pinos no dispositivo foi necessária a usinagem de um micro mandril com diâmetro de aproximadamente 3mm para inserção dos corpos de prova para o ensaio. O mandril foi usinado a partir de liga de alumínio (figura 3.4).

**Figura 3.46** Mandril de fixação dos corpos de prova.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A indicação do início e fim do percurso do carrinho do disco durante o ensaio é controlada por um sensor elétrico interligado a um microcontrolador contendo uma linguagem de programação com o código C++ (Figura 3.5). Esse código configura variáveis controláveis do ensaio: a velocidade de rotação e a velocidade linear de avanço do disco, ao qual podem ser modificadas conforme a necessidade do ensaio.

**Figura 3.5** Dispositivos do controle de comandos do equipamento.

Onde: 1- Sensor elétrico indicador de início e fim de percurso. 2 ó microcontrolador ~~Arduino~~  
 Fonte: Acervo pessoal (2016).

### 3.2. ENSAIOS PARA COMPARAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS

Foram realizados ensaios de desgaste abrasivo na UFPE e LFS-USP sob as mesmas condições. A princípio o aço 1045 e uma liga de alumínio foram submetidos ao ensaio, posteriormente, quatro composições diferentes de aço Hadfield. O tópico aborda sobre os materiais empregados na pesquisa, as condições do ensaio e os parâmetros usados.

#### 3.2.1. Materiais

Para comparar o dispositivo pino-disco foram usinados corpos de prova de aço SAE 1045 e Alumínio 6351 ó T6. As fichas técnicas e certificados de qualidade foram disponibilizados, apresentando suas composições, conforme a tabela 3.1.

**Tabela 3.1** ó Materiais utilizados para a validação do dispositivo.

Material	Composição %										
	C	Al	P	S	Si	Mn	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti
AÇO SAE 1045	0,45	-	0,02	0,03	0,89	0,18	> 95	-	-	-	-
Alumínio 6351 - T6	-	96,60	-	-	1,00	0,60	0,50	0,60	0,60	0,20	0,20

C ó Carbono, Al ó Alumínio, P ó Fósforo, S ó Enxofre, Si ó Silício, Mn ó Manganês, Fe ó Ferro, Cu ó Cobre, Mg ó Magnésio, Zn ó Zircônia, Ti ó Titânio.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

O laboratório de fenômenos de superfície da Universidade Federal de São Paulo disponibilizou corpos de prova do aço Hadfield extraídos de mandíbulas de britadores pelo processo de corte por eletroerosão a fio, conforme tabela 3.2.

**Tabela 3.2** ó Aço Hadfield com diferentes teores de carbono.

Material	Designação	Composição %	
		C	Mn
Aço Hadfield	VL 02	1,00	9,66
Aço Hadfield	VL 03	1,10	10,1
Aço Hadfield	CB 01	1,40	9,66
Aço Hadfield	VL 01	1,50	9,36

O teor de C foi fornecido pela USP, o teor de Mn foi obtido pela análise do EDS erro médio de 0,35%.

Foram detectados outros elementos pela análise do espectro obtido pelo EDS.

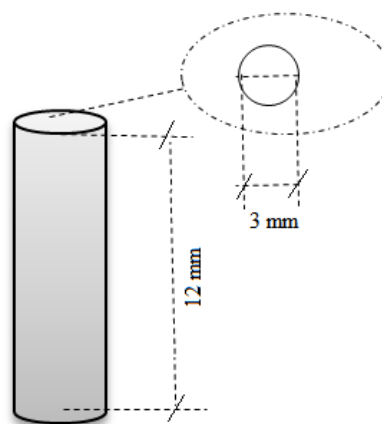
Em todos os aços detectou Si, no aço VL 01- Cr e no aço CB 01 ó Cr e Al

Fonte: Acervo pessoal (2016).

### 3.2.2. Corpos de Prova

Os corpos de prova apresentam-se sob forma cilíndrica de diâmetro e comprimento médio de 3mm e 12mm respectivamente (Figura 3.6). Para os ensaios realizados na USP foram disponibilizados três corpos de prova do aço 1050 e o Al 6351-T6.

**Figura 3.6** ó Ilustração dos corpos de prova utilizados no ensaio.



Sendo que o comprimento para os corpos de prova do aço Hadfield variaram entre 12-15mm.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

### 3.2.3. Abrasivos

Foram utilizadas lixas com costado de tecido tipo lonita, como abrasivo. Três diferentes granulometrias do abrasivo foram utilizadas: # 150, # 220 e # 320 e seus respectivos intervalos médios de aberturas granulométricas são: 88-105  $\mu\text{m}$ ; 74-62  $\mu\text{m}$  e 53-44  $\mu\text{m}$ . As lixas foram cortadas em formato circular com o raio de 80 mm. A lixa #220 foi disponibilizada para os ensaios realizados na USP para fins comparativos.

### 3.3. O ENSAIO: PINO-DISCO

Os parâmetros para a realização dos ensaios de desgaste abrasivo no equipamento do tipo pino-lixo são apresentados ao longo da metodologia do trabalho.

#### 3.3.1. Princípio físico do ensaio

O pino sob ação de uma carga, em contato com a superfície do disco sob o movimento rotacional e de avanço, descreve uma trajetória sob a forma da espiral de Arquimedes, evitando assim a sobreposição do abrasivo durante o ensaio. Ao final do procedimento, as amostras foram limpas e pesadas, com o objetivo de medir a perda de massa durante o ensaio. A figura 3.7 exibe a ilustração da trajetória do pino e a imagem do dispositivo da UFPE em operação.

**Figura 3.7** Ilustração do contato pino-disco e o dispositivo montado na UFPE.

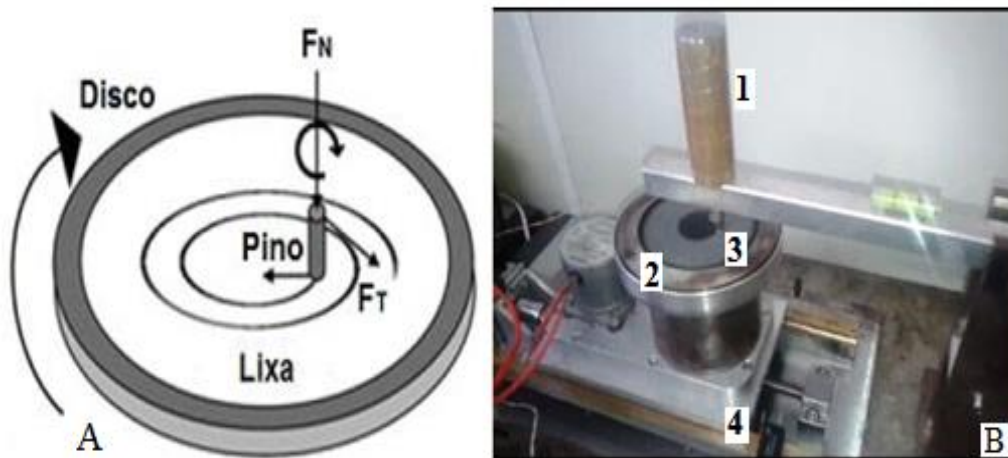


Figura (A) mostra a ilustração do movimento do pino em relação ao disco, onde  $F_N$  é a força aplicada sob o pino e  $F_t$  é a força tangencial. A figura (B) exibe o dispositivo pino-disco UFPE, ilustrando: 1 ó Carga, 2 ó Disco, 3 ó Pino e 4 ó sensor de movimento (início - fim).

Fonte: Acervo pessoal (2016).

### 3.3.2. Descrição do ensaio

Inicialmente, o computador é ligado paralelamente ao equipamento, uma vez que são interligados. Durante a execução dos ensaios, foi permitido ao operador manipular alguns parâmetros do ensaio, tais como: a rotação do disco, a velocidade de avanço do carrinho do disco e a carga aplicada. A rotação e a velocidade podem ser definidas ao inserir os dados no *software* (desenvolvido na UFPE, conforme figura 3.8). A carga aplicada sob o material durante o ensaio é realizada manualmente utilizando as anilhas de Inox usinadas, que foram mencionadas anteriormente. O sensor elétrico controla o início e o fim do ensaio.

**Figura 3.8** Software desenvolvido na UFPE para o abrasômetro pino-disco.

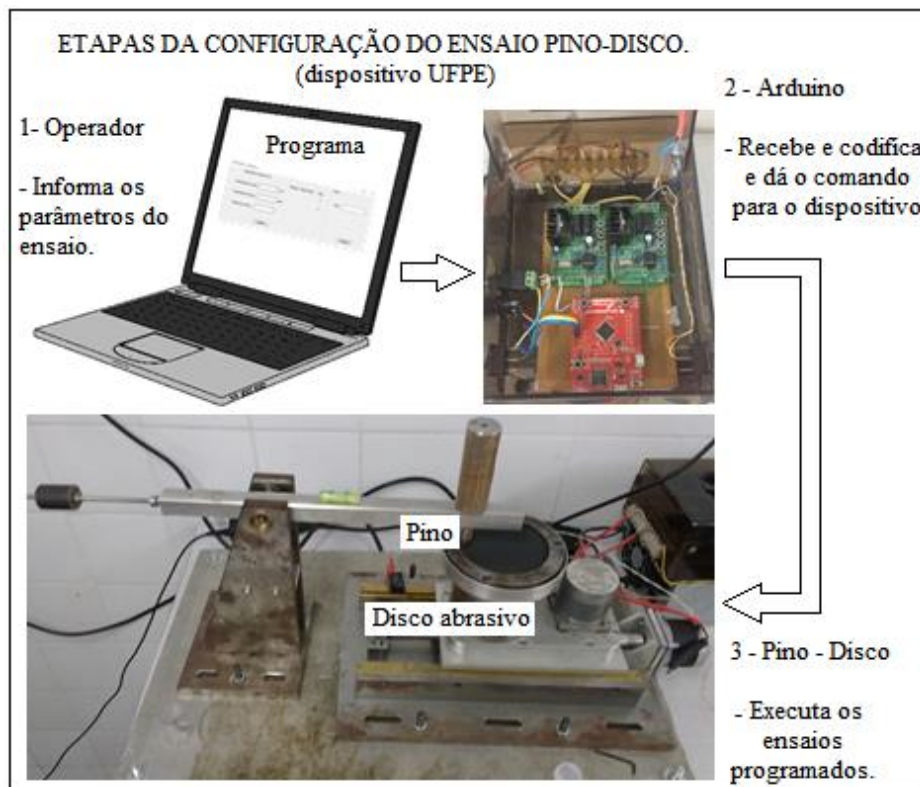
Os parâmetros que podem ser informados no programa são: velocidade do carro em m/s e velocidade do disco em RPM.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 3.9 exibe a esquematização referente às etapas de configuração do dispositivo para o ensaio, interligando todos os componentes necessários para a sua realização. Definidos os parâmetros do ensaio pelo operador e transmitidos ao *software*, o arduíno recebe e codifica o código informando ao dispositivo que, simultaneamente, inicia o ensaio. Ao percorrer a trajetória estabelecida o movimento do disco e do carrinho cessa, concluindo o ensaio.



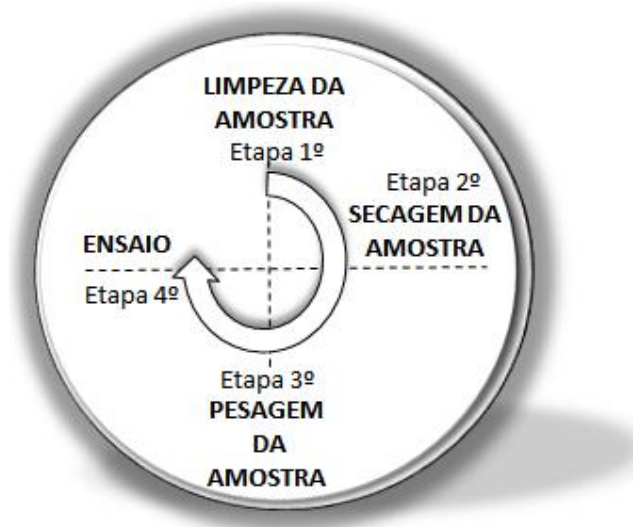
**Figura 3.9** Esquemática das etapas de configuração do dispositivo.



Fonte: Acervo próprio (2016).

Para o ensaio foi necessária a preparação dos corpos de prova. Para tanto, fez-se mister a limpeza da amostra, seguidamente, sua secagem e, finalmente, sua pesagem. Ao fim dessas etapas, o corpo de prova estava preparado para o ensaio. A figura 3.10 exibe as etapas do procedimento experimental.

**Figura 3.10** Etapas do procedimento experimental.



Fonte: Acervo pessoal (2016).



Todas as etapas necessárias para a execução do ensaio estão descritas detalhadamente na figura 3.11.

**Figura 3.11** Descrição do processo experimental.

ITEM	ETAPAS	DESCRIÇÃO
1	Cortar as lixas e fixação no dispositivo	As lixas foram cortadas e fixadas no do disco.
2	Limpeza do Pino (CP)	A limpeza foi feita por meio da imersão do CP em acetona PA em um banho ultrassônico em $t = 5$ minutos, seguido da secagem do CP por cinco minutos em um secador de cabelo convencional.
3	Pesagem do CP	Após a limpeza em uma balança analítica em um ambiente à $T = 20^{\circ}\text{C}$ o CP é pesado. Para cada corpo de prova foram realizadas três pesagens, utilizando a média das medidas.
4	Preparação do Ensaio ó Fixação do CP	O corpo de prova foi fixado no mandril e posicionado para o início do ensaio.
5	Preparação do Ensaio ó Cargas aplicadas	Após definida as cargas que o sistema pino-disco é submetido, utilizou-se as anilhas usinadas como cargas sobreposta no pino.
6	Posição do conjunto Pino-Disco	A posição do conjunto pino-disco deverá estar no início de percurso, caso não esteja, retorne-a.
7	Início do ensaio - Software	Informar ao software todas as condições desejadas: Velocidade do carro, Rotação do disco, N° ciclos ( $n=1$ ) e definir o sentido do movimento (horário ou anti). E finalmente inicia-se o ensaio.
8	Término do ensaio	Após percorrer toda a trajetória o conjunto pino-disco suspende o movimento e o CP poderá ser extraído e preparado para as etapas (2) e (3), para obter a variação de massa inicial e após o ensaio.
9	Início de um novo ensaio	Ao extrair o CP o conjunto o pino-disco retorna para o início de percurso. Para cada novo ensaio a lixa é substituída
10	Quantidade de ensaios	Para cada material estudado foi disposto três CPs, que foram ensaiados cinco vezes, totalizando 15 ensaios por material. Dessa forma obteve-se a média da perda de massa referente a cada material estudado.

Fonte: Acervo próprio (2016).

Como mencionado na figura 3.11, o corpo de prova é submetido à pesagem antes e após o ensaio. A diferença obtida permite determinar a perda de massa e, conseqüentemente, auxilia na determinação da taxa de desgaste e resistência ao desgaste. Foi utilizada uma balança analítica modelo ATY224 com capacidade de 220 gramas, marca Shimadzu, com precisão de 0,1 miligramas. A seguir são exibidas as equações utilizadas na análise dos resultados experimentais.

$Perda\ de\ massa = m_{inicial} - m_{final}$	Equação 3.1
$Taxa\ de\ desgaste = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{tempo\ (min.)}$	Equação 3.2
$Taxa\ de\ desgaste = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{deslocamento\ (mts.)}$	Equação 3.3
$Resist\ \acute{e}ncia\ ao\ desgaste = \frac{1}{Taxa\ de\ desgaste}$	Equação 3.4

Na etapa da limpeza dos corpos de prova, as amostras foram submergidas em um banho ultrassônico modelo 03350, com frequência aproximada de 40 KHz, marca Quimis.

Os parâmetros utilizados para o ensaio foram: (a) a velocidade de rotação do disco de aproximadamente 66 RPM; (b) a velocidade linear de avanço do carrinho de 0.35mm/min e (c) a carga aplicada 4,6N. O pino descreve uma trajetória ao longo do ensaio sobre o disco similar ao descrito pela espiral de Arquimedes. É definido como sendo raio inicial do percurso de 40mm e final de 5mm, resultando em uma distância total percorrida de 16,95 metros para cada lixa. Foram realizados ensaios na UFPE sob as condições citadas e reproduzidos pelo LFS-USP para fins comparativos.

### 3.3.3. Avaliação dos parâmetros de ensaio.

Foram realizados ensaios para investigar a influência dos parâmetros de ensaio. No experimento, foram analisados: o tamanho do abrasivo e a ação da carga no aço SAE 1045 e Al 6351-T6. Inicialmente, verificou-se a atuação de diferentes do tamanho do abrasivo, utilizando as três lixas: #150, #220 e #320, mantendo a carga aplicada (4,6N) inalterada. Em relação ao efeito da carga, o ensaio foi realizado no intervalo de 4,0 a

5,0N aditando parcelas incrementais de 0,2 N, para a análise da relação da carga foi utilizado somente o abrasivo #220.

### **3.4. ESTUDO DAS PROPRIEDADES NO ENSAIO PARA O AÇO HADFIELD**

#### **3.4.1. Ensaio de desgaste no aço Hadfield**

O aço Hadfield com as quatro composições distintas foram submetidas ao ensaio de desgaste abrasivo no dispositivo pino disco, seguindo o procedimento mencionado anteriormente. Para evidenciar o efeito do ensaio sobre o mecanismo de encruamento, as amostras das diferentes composições do aço foram ensaiadas utilizando os abrasivos # 150 e #220, submetidos à carga de 4,6N.

#### **3.4.2. Caracterizações microestruturais**

##### **3.4.2.1. Microdureza Vickers (HV)**

As amostras do material foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers (HV) com o objetivo de verificar o processo de encruamento no material.

Para o ensaio de microdureza foi utilizado um durômetro automático digital Micro-Vicker, modelo ISH-TDV1000. A carga utilizada para realizar o ensaio foi de 25g (HV 0,025) e o tempo de ensaio foi cerca de 1 minuto para cada indentação. Para cada amostra analisada, um total de 5 medidas foram realizadas. Os resultados estão apresentados sob a forma de valores médios com seus respectivos desvios padrão. O ensaio de microdureza foi realizado antes e após os ensaios abrasivos para fins comparativos.

##### **3.4.2.2. Análise microestrutural**

Utilizando microscópio óptico modelo BX51M-marca Olympus, simultâneo ao *software* Analysis, foi possível obter e analisar as imagens nas superfícies dos aços Hadfield. Esta etapa dos testes teve como objetivo fazer uma análise da microestrutura dos materiais. Para a análise da microestrutura, a superfície é preparada através do lixamento. Neste processo foram utilizadas lixas de água de granulometria crescente,

iniciando com #80 e seguindo com #200, #400, #600, #1000 e #1200. Durante a mudança de granulometria das lixas, observou-se a mudança de direção do lixamento de, aproximadamente 90°, em relação à direção anterior. Em seguida, o material foi submetido ao polimento, utilizando a pasta de diamante. Após o polimento, a amostra foi imersa em uma solução de nital 4% (Solução de ácido nítrico de 4% em álcool etílico) para o ataque da superfície da amostra, visando evidenciar os contornos dos grãos.

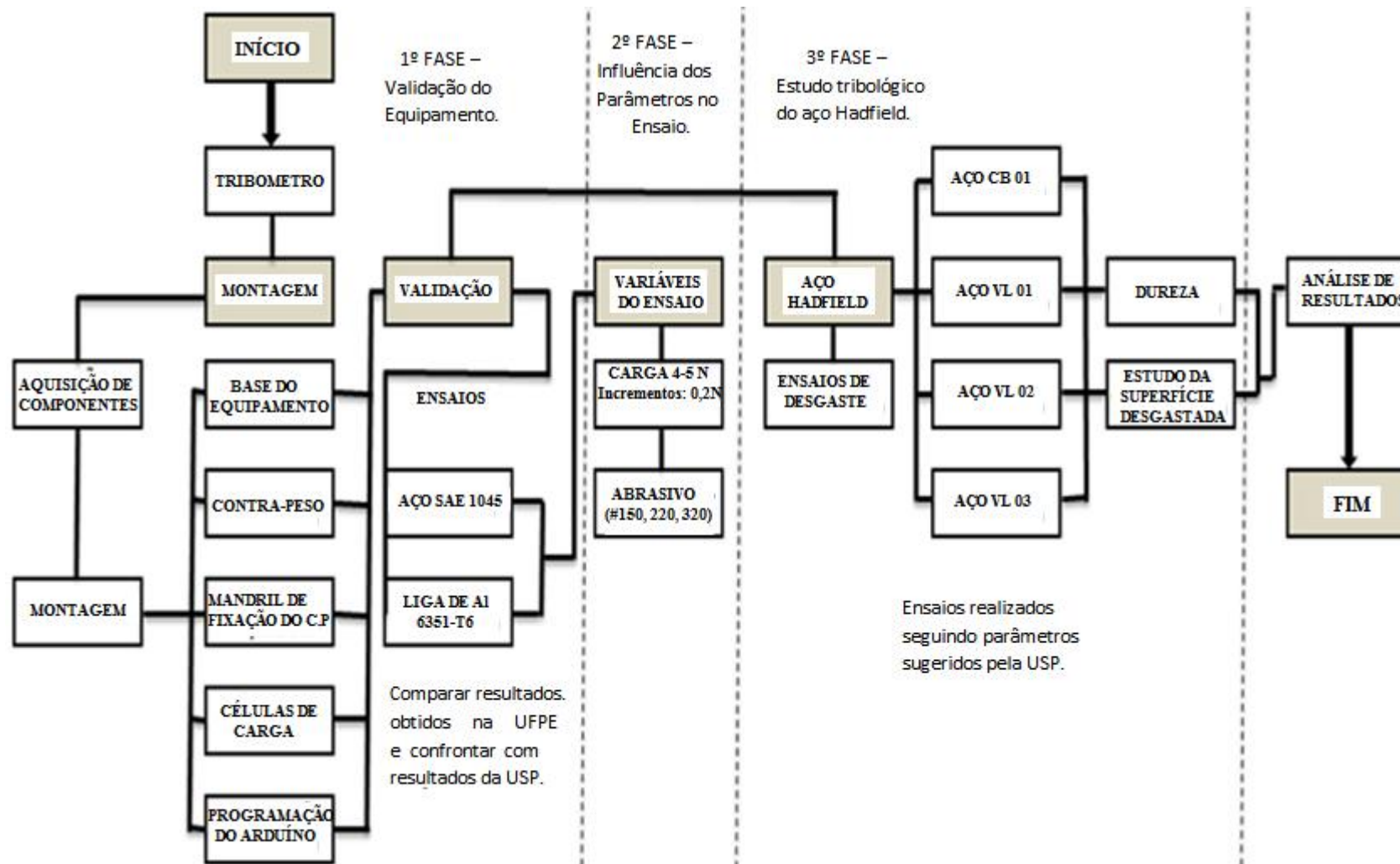
#### **3.4.2.3. Análise da superfície desgastada**

Para verificar o comportamento da superfície desgastada, imagens microscópicas foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS), modelo TM3000, marca Hitachi, com espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para o mapeamento químico da superfície.

### **3.5. FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DO ESTUDO**

A figura 3.12 exibe o resumo da metodologia empregada no estudo, a qual foi dividida em três etapas: A primeira descreve a montagem do equipamento e sua validação, comparando os resultados obtidos em ensaios realizados em outra instituição de ensino. A segunda etapa consiste na análise de parâmetros de influência nos ensaios e a terceira, consiste em avaliar o comportamento do aço Hadfield no equipamento e confrontar com resultados da USP.

Figura 3.12 6 Esquematização da metodologia do projeto



Fonte: Acervo pessoal (2016).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados todos os resultados e discussão inerentes à pesquisa desenvolvida correlacionando com trabalhos disponíveis na literatura. Inicialmente são exibidos os resultados experimentais que, seguidamente, foram comparados com resultados obtidos em outra instituição, sob as mesmas condições de ensaio. Na segunda etapa foram investigadas variáveis do ensaio (carga e tamanho das partículas abrasivas) e os impactos gerados por elas no ensaio. Finalmente, na terceira etapa do projeto foi avaliada as diferentes composições do aço Hadfield submetidas ao desgaste abrasivo ao tempo em que foi verificada a influência de sua composição após os testes.

#### 4.1. ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

Nessa etapa experimental, avaliou-se a perda de massa em consequência calculou a taxa e a resistência ao desgaste nos ensaios abrasivos dos materiais. Os valores individuais de perda de massa de todos os ensaios estão apresentados no Apêndice C.

##### 4.1.1. Perda de massa

O Aço SAE 1045, o alumínio 6351-T6 e as quatro diferentes composições do aço Hadfield foram ensaiadas a fim de verificar a perda de massa em relação ao tempo de ensaio. Os resultados são exibidos na tabela 4.1 e dispostos na figura 4.1 por meio de um gráfico.

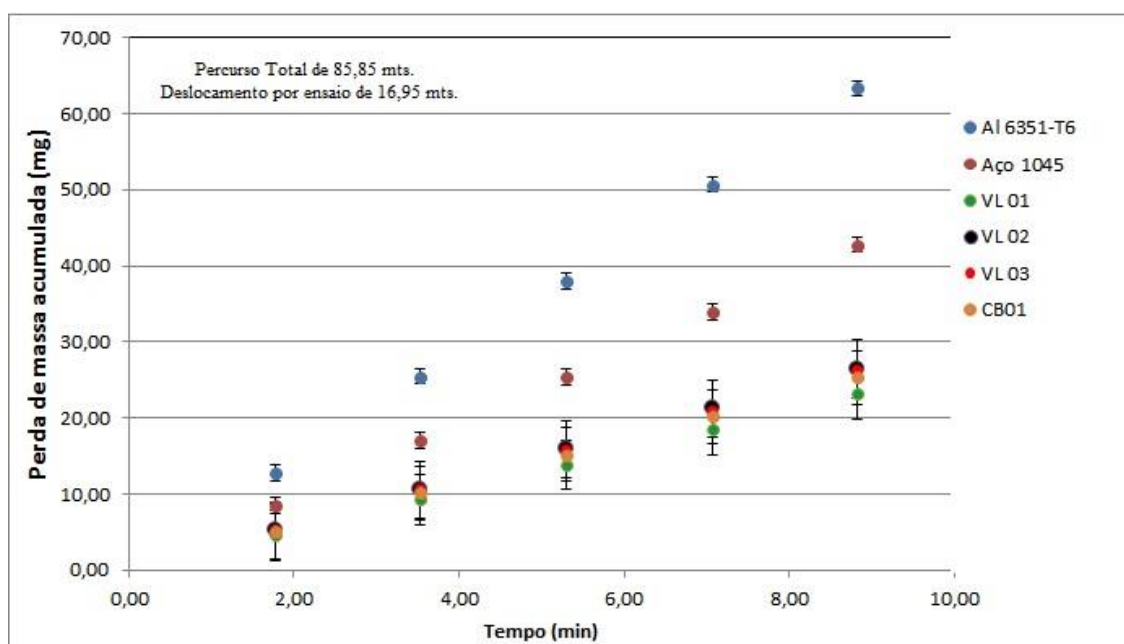
Tabela 4.1 ó Perda acumulada média de massa obtida nos ensaios.

Tempo Deslocamento		Perda de massa acumulada (mg)					
(min)	(mts.)	Al 6351-T6	Aço SAE 1045	VL 01	VL 02	VL 03	CB01
1,77	16,95	12,77 ± 0,13	8,52 ± 0,30	4,58 ± 0,07	5,25 ± 0,12	5,33 ± 0,12	5,03 ± 0,21
3,53	33,90	25,47 ± 0,13	17,03 ± 0,30	9,28 ± 0,07	10,53 ± 0,12	10,54 ± 0,12	10,11 ± 0,21
5,30	50,85	38,03 ± 0,13	25,42 ± 0,30	13,85 ± 0,07	15,90 ± 0,12	15,77 ± 0,12	15,20 ± 0,21
7,07	67,80	50,70 ± 0,13	33,97 ± 0,30	18,50 ± 0,07	21,29 ± 0,12	20,98 ± 0,12	20,17 ± 0,21
8,83	84,75	63,37 ± 0,13	42,80 ± 0,30	23,18 ± 0,07	26,47 ± 0,12	26,24 ± 0,12	25,31 ± 0,21

Onde: A perda de massa por ensaio (t=1.77min) é acumulativa . Utilizou o abrasivo # 220 (74-62 $\mu$ ).

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Figura 4.1 ó Gráfico da evolução da perda de massa média com o tempo.



Onde: Foram realizados cinco ensaios e cinco repetições para cada ensaio.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

O comportamento mencionado descrito por Batista (2002) sobre o período de amaciamento (*running-in*) não é apresentado para nenhum dos materiais mencionados no gráfico da figura 4.1. Provavelmente, pode ocorrer em um período inferior à distância percorrida equivalente a uma lixa.

Em relação aos dados exibidos na figura 4.1 ligados aos valores expostos na tabela 4.1 é possível observar a ordem de redução de massa dos materiais submetidos ao ensaio, em ordem crescente tem-se: VL 01 ( 23 mg), CB 01 ( 25 mg), VL 03 e VL 02 ( 26 mg), 1045 ( 43 mg) e Al ( 63 mg). O alumínio, portanto, durante o ensaio apresenta uma perda de massa média superior a todos os outros materiais ensaiados. Comparando o material que apresentou maior perda de massa no ensaio o alumínio o em relação aos respectivos aços, maior e menor redução de massa após o ensaio o 1045 e VL 01 o, tem-se o alumínio perdendo massa, aproximadamente 49% a mais que o aço 1045 e 175% em relação ao VL 01. Isso ocorre devido ao alumínio apresentar características de um metal mais macio quando comparado ao aço.

A perda de massa média obtida foi extraída para cada material depois da análise dos resultados obtidos, após a realização de 15 ensaios. A tabela 4.2 exibe em ordem crescente a perda de massa média para cada material.

**Tabela 4.2** a Perda média de massa para os materiais.

<b>Material</b>	<b>Perda de massa média (mg)</b>
VL 01	4,64 ± 0,07
CB01	5,06 ± 0,16
VL 03	5,25 ± 0,12
VL 02	5,29 ± 0,12
Aço 1045	8,56 ± 0,30
Al 6351-T6	12,67 ± 0,13

Considerando o tempo de ensaio de 1,77 minutos.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Em referência aos valores de perda de massa média exibidos na tabela 4.2, um estudo do aço 1045 e da liga de alumínio submetidos ao ensaio de desgaste abrasivo do tipo pino-disco, sob as mesmas condições foi realizado por Coronado (2010). Analisando o gráfico dos resultados experimentais fornecidos da perda de massa para o aço e alumínio, presumem-se perdas nos intervalos de 15-17 mg e 20-23 mg para os respectivos materiais. Comparando os resultados, observa-se uma inconstância entre os valores obtidos nos experimentos, nos quais, se tem um intervalo de diferença de resultados exibidos pelo autor que é superior aos exibidos na tabela 4.1. Acerca disso,



estima-se que a variação experimental dos ensaios é próxima dos intervalos de 76-100% para o aço e 58-82%, para o alumínio.

#### 4.1.2. Taxas de desgaste

A tabela 4.3 exibe a taxa de desgaste média em ordem crescente para os materiais ensaiados em função ao tempo de ensaio.

**Tabela 4.3** Taxa média de desgaste por ensaio.

Material	Taxa de desgaste	
	mg/min.	
VL 01	2,62	± 0,04
CB 01	2,87	± 0,09
VL 03	2,97	± 0,07
VL 02	3,00	± 0,07
AÇO 1045	4,85	± 0,17
Al 6351 - T6	7,17	± 0,08

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A taxa de desgaste para os materiais foi obtida através da relação entre média da perda de massa e o tempo de ensaio. Os resultados da tabela 4.3 mostram que a taxa de desgaste média para o aço VL 01 desgastou é 2,7 vezes menor que a do Al 6351 e 1,7 inferior a taxa do aço 1045.

Rocha (2011), em seu experimento, submeteu ao ensaio pino-disco em seis materiais de composições distintas, sendo que, quatro são aços Hadfield. O autor exibiu nos resultados experimentais valores de taxa de desgaste para o aço Hadfield que variam entre 9,7 a 12,8 mg/min. É impossível confrontar os resultados obtidos pelo autor em relação aos obtidos no experimento, visto que as condições de ensaio foram extremamente distintas. No experimento, por exemplo, o autor utiliza a velocidade linear de 33 m/min, a carga de 4410N, a velocidade de rotação do disco de 50 RPM e a área da superfície de ensaio, ou seja, o diâmetro do corpo de prova, de 10 milímetros. Contudo, posteriormente os resultados experimentais voltarão a serem discutidos em relação a influência do teor do carbono na resistência ao desgaste do material.

### 4.1.3. Erro médio experimental obtido

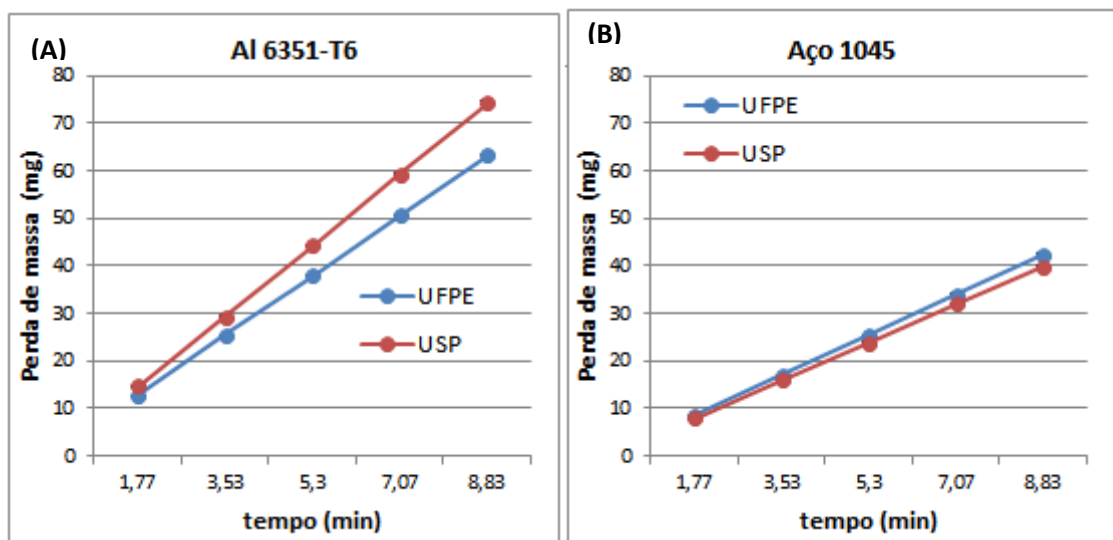
Durante todo o experimento foram realizados aproximadamente 360 ensaios de desgaste abrasivo para os diferentes tipos de materiais e condições determinadas. Os erros experimentais durante o progresso da pesquisa foi medido com o propósito de averiguar a repetitividade dos resultados dos ensaios. Diante disso, foi constatada uma tendência linear experimental, tendo uma variação experimental no intervalo de 0,76% a 5,56%.

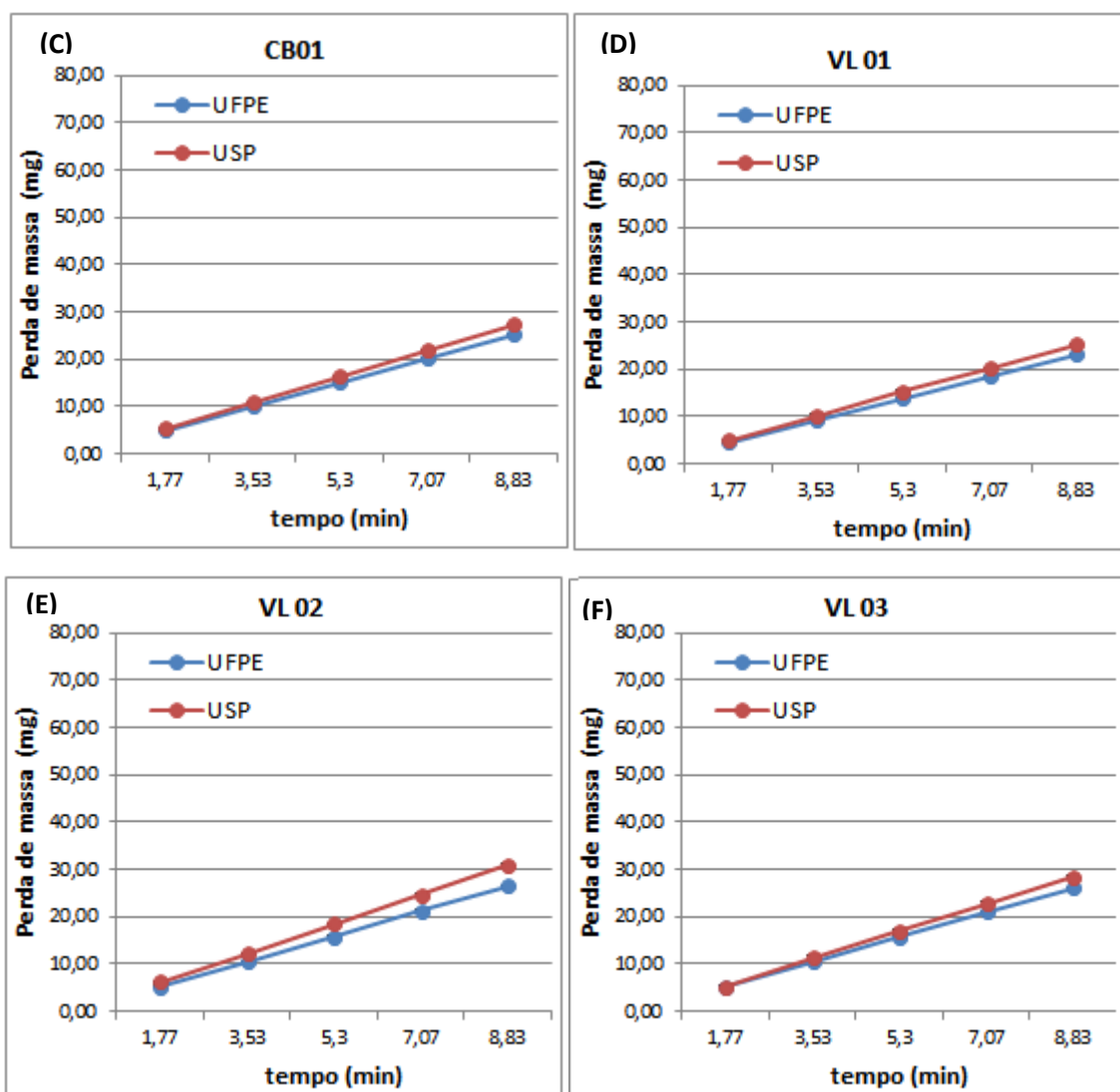
## 4.2. COMPARAÇÃO DE ENSAIOS DE DESGASTE (UFPE X USP)

### 4.2.1. Comparação entre diferentes laboratórios

Para analisar os resultados obtidos pelo dispositivo pino-disco montado na UFPE, foram realizados ensaios no laboratório de fenômenos de superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP), considerando, condições similares da metodologia aplicada na UFPE. Os resultados do ensaio das instituições estão dispostos sob o efeito de confrontar individualmente a evolução dos materiais em relação à perda de massa. A figura 4.2 exibe os resultados.

Figura 4.2 Gráficos comparativos da perda de massa no ensaio de desgaste.





Os valores de incerteza de medição pequenos que dificultam a visualização nos gráficos. Cada ensaio dura em média 1 min e 46 segundos (1,7 min.) e o pino percorre 18,95 mts.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Os resultados exibidos na figura 4.2 mostram a divergência entre os ensaios realizados em diferentes instituições. Observa-se que a perda de massa foi relativamente superior nos experimentos realizados na USP, exceto o aço 1045 que exibiu valores superiores para o ensaio realizado na UFPE. Com relação à variação experimental obtida, pode ser atribuída a diversos fatores, visto que, nos resultados do aço 1045 apresentados por Coronado (2010), foi certificado que o sistema tribológico é complexo, uma vez que, a variação dos resultados obtidos aproximou-se do intervalo de 76 a 100% com condições de ensaio inalteradas. Assim sendo, é importante para a reprodução de um ensaio, que todos os parâmetros sejam bem definidos. A tabela 4.4

exibe a variação experimental em ordem crescente para os materiais submetidos ao ensaio.

**Tabela 4.4** Variação experimental entre instituições da taxa de desgaste abrasivo.

Material	Taxa de desgaste (mm/min)		Variação
	UFPE	USP	UFPE X USP
AÇO 1045 *	4,85 ± 0,17	4,52 ± 0,10	7,30%
CB 01	2,87 ± 0,09	3,1 ± 0,13	8,01%
VL 03	2,97 ± 0,07	3,23 ± 0,29	8,75%
VL 01	2,62 ± 0,04	2,87 ± 0,09	9,54%
VL 02	3,00 ± 0,07	3,5 ± 0,12	16,67%
Al 6351	7,17 ± 0,08	8,41 ± 0,17	17,29%

\* Único material que exhibe maior taxa de desgaste nos ensaios da UFPE em relação a USP.

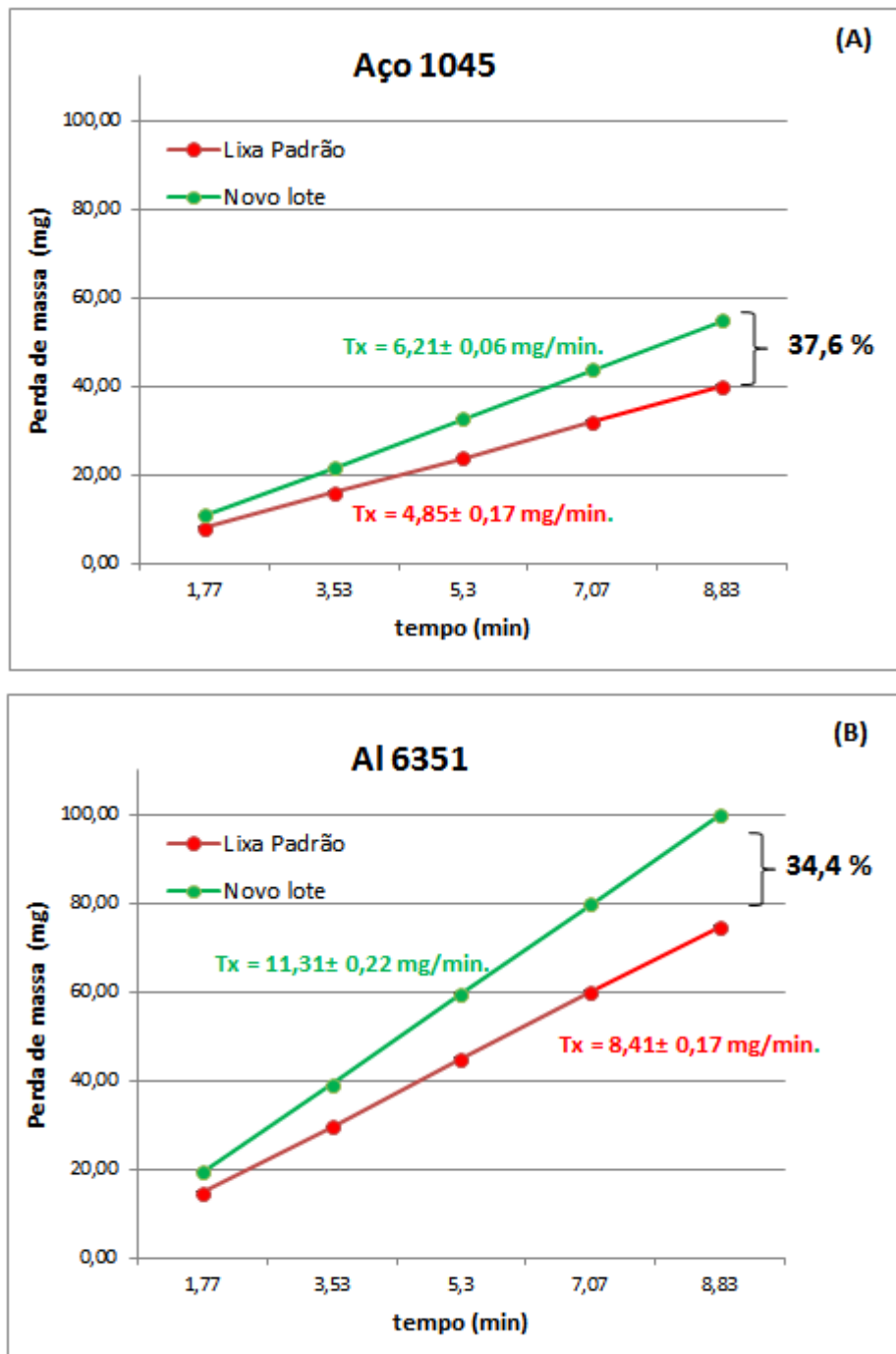
Fonte: Acervo pessoal (2016).

A variação experimental pertinente aos ensaios realizados entre a UFPE e USP exibida na tabela 4.4 fornece informações em que se constata a dispersão dos resultados inerentes à taxa de desgaste obtida. O intervalo de instabilidade para as instituições é de 7-18%. O Aço SAE 1045 não excede 8%, enquanto que o Al 6351 e o V1 02 excedem 17%. O alumínio apresenta características distintas em relação aos outros materiais ensaiados, visto que o material apresenta uma dureza aproximada de 95 HB, apontando características distintas em relação aos outros materiais que exibem uma superioridade na dureza, em média 200 HB. Ainda assim a variação é observada para o aço V1 02, indicando que esse fato pode ser atribuído a outros fatores.

A taxa de desgaste exibida na tabela 4.4 indica uma leve tendência para a variação experimental entre as instituições de aproximadamente 8%. A disparidade dos resultados apresentada pode estar relacionada, principalmente, há erros instrumentais, cujos parâmetros utilizados no ensaio foram delimitados manualmente (cargas, rotação do disco, contrapeso) gerando prováveis fontes de erros experimentais.

Para investigar a inconstância do ensaio e verificar possíveis fontes externas que colaboram para a variação experimental entre as instituições, a USP submeteu ao ensaio o aço 1045 e o alumínio, conforme o procedimento experimental definido, porém, o abrasivo é oriundo de lotes de fabricação diferentes dos utilizados em toda a pesquisa.

Figura 4.3 ó Gráficos de perda de massa em função do tempo para diferentes lotes de lixa.



Onde: (A) Ensaios referentes ao aço 1045 e (B) ao Al 6351.

Para o ensaio um único CP foi utilizado. Foram realizados cinco ensaios.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Diante dos resultados exibidos na figura 4.3 foi observado que durante os ensaios realizados na USP, as lixas com mesmas especificações técnicas produziram variações significativas nos resultados obtidos, apontando um aumento significativo no fenômeno, superior a 37% referente à perda de massa para o aço 1045 e 34% para o

alumínio 6351. À vista disso, é possível justificar a significativa variação experimental obtida quando os resultados de ensaios sob mesmas condições são confrontados.

A tabela 4.5 exibe os resultados da média da perda de massa dos materiais submetidos ao ensaio variando o lote do abrasivo.

**Tabela 4.5** 6 Perda de massa variando o lote do abrasivo.

Material	Perda de massa		Variação
	(mg)		
	lixa Padrão	Novo Lote	
AÇO 1045	14,87 ± 0,31	19,98 ± 0,38	34,36%
Al 6351	7,98 ± 0,17	10,98 ± 0,11	37,59%

Fonte: Acervo pessoal (2016).

É possível observar a divergência referente aos resultados obtidos, somente pela mudança do lote de fabricação do abrasivo, sugerindo cautela ao preparar toda a metodologia do ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste mostram que sua interpretação deve ser extremamente cautelosa, particularmente, quando ocorre comparação dos resultados de laboratório para laboratório. Se houver grandes variações nos resultados realizados em máquinas diferentes, as diferenças no comportamento das propriedades de desgaste dos materiais examinados podem estar relacionadas com diferenças no *design* dos equipamentos, nos ajustes do ensaio, na precisão da balança e do operador ao medir os corpos de prova, diferenças em processos de fabricação e usinagem dos materiais.

### 4.3. PARÂMETROS QUE INFLUÊNCIAM NO ENSAIO

Nesse tópico serão discutidos resultados inerentes a variáveis operacionais que influenciam em ensaios de desgaste exibidos em pesquisas na área tribológica.

#### 4.3.1. Efeito da carga no ensaio

A variação da carga é aplicada durante o ensaio de desgaste no aço 1045 e Al 6351, a tabela 4.6 exibe os resultados experimentais obtidos para os materiais.

**Tabela 4.6** Perda de massa em função da carga aplicada.

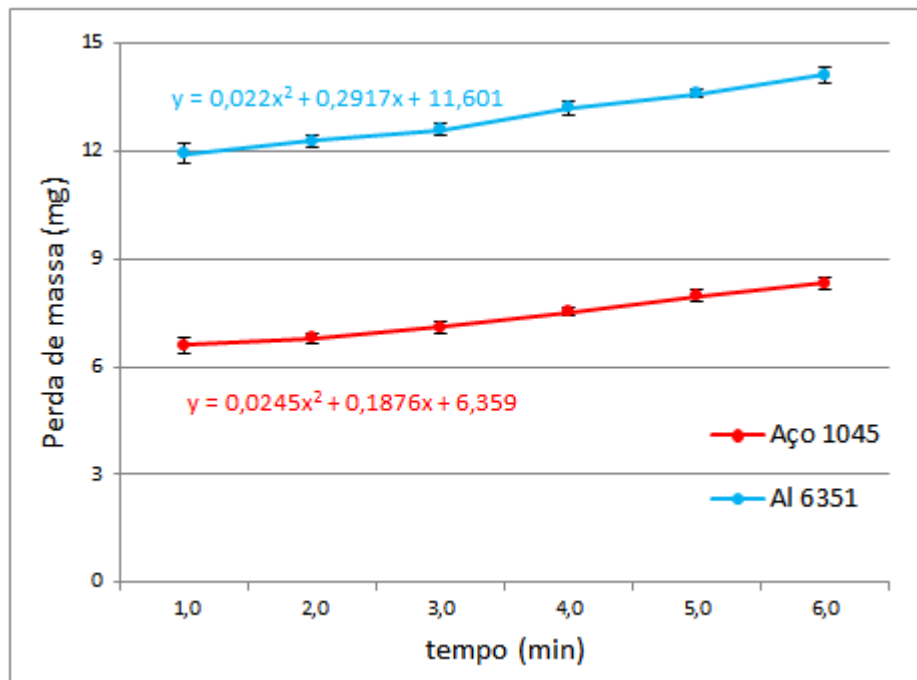
Carga (N)	Perda de massa (mg)			Carga (N)	Perda de massa (mg)		
	Al 6351				Aço 1045		
4,0	11,93	±	0,28	4,0	6,6	±	0,21
4,2	12,27	±	0,17	4,2	6,8	±	0,14
4,4	12,6	±	0,15	4,4	7,1	±	0,17
4,6	13,20	±	0,20	4,6	7,53	±	0,12
4,8	13,6	±	0,10	4,8	7,96	±	0,16
5,0	14,13	±	0,22	5,0	8,33	±	0,16

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Analisando a tabela 4.6 constata-se que o aumento na perda de massa, isto é, a resistência ao desgaste dos materiais, reduz com o aumento da carga aplicada. Esse efeito é descrito pela expressão matemática proposta por Archard, na qual o volume desgastado é proporcional à carga aplicada. Diversos autores validam a equação em seus trabalhos, e isso se deve ao comportamento similar ao descrito pelo modelo, entretanto, alguns autores citam que o crescimento não é preciso tanto como o modelo descreve.

Com base nos resultados apontados na tabela 4.6 variação de carga no experimento (1,0N), ou seja, a ramificação dos valores obtidos no intervalo entre as cargas 5,0N e 4,0N gera um aumento de perda de massa durante o ensaio de aproximadamente 18% para o alumínio e 26% para o aço.

Os dados experimentais apresentados na tabela 4.6 estão dispostos sob forma de curva na figura 4.4, onde é possível visualizar a relação entre a perda de massa (mg) carga (N) do ensaio.

**Figura 4.4** - Perda de massa dos materiais em função da variação da carga aplicada.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.4 apresenta a relação entre a perda de massa e a carga aplicada durante os ensaios, obtida para o aço 1045 e o Al 6351-T6. Nos resultados experimentais exibidos é possível verificar o aumento progressivo na perda de massa em função do aumento da carga aplicada. Segundo Hirst e Lancaster (1956), conforme citados por Camilo (2010) a carga tem influência na transição do regime de desgaste, contudo, não foi possível observar tal fenômeno com exatidão ao longo do experimento, provavelmente, explicado pelo pequeno aumento da carga durante os ensaios, contudo, uma análise minuciosa sobre os resultados obtidos podem apontar indícios de tal comportamento.

Equações baseadas nos resultados obtidos experimentalmente foram modeladas por intermédio de aplicação de ajuste de curvas, essas expressões matemáticas podem prescrever um provável comportamento dos materiais submetidos a condições não descritas durante o experimento, predizendo novos resultados. As equações são exibidas na figura 4.4, e, por isso, uma relação entre a perda de massa e carga foi determinada para o experimento. Os dados do fenômeno são exibidos na tabela 4.7, detalhado a relação em função dos incrementos de carga utilizados ao decorrer do ensaio.



**Tabela 4.7** Relação de perda de massa em função da carga aplicada.

Al 6351			Aço 1045		
Carga	PM	PM/C	Carga	PM	PM/C
N	mg	N/mg	N	mg	N/mg
4,00	11,93	2,98	4,00	6,60	1,65
4,20	12,27	2,92	4,20	6,80	1,62
4,40	12,60	2,86	4,40	7,10	1,61
4,60	13,20	2,87	4,60	7,53	1,64
4,80	13,60	2,83	4,80	7,96	1,66
5,00	14,13	2,83	5,00	8,33	1,67

Onde: PM é a perda de massa no ensaio, C é a carga aplicada e PM/C é a relação incremental de ganho de massa por unidade de força (taxa de ganho de massa por unidade de carga).

Fonte: Acervo pessoal (2016).

É possível observar na tabela 4.7 que a relação ganho de massa por unidade de carga, ou seja, a taxa de desgaste em função da carga aplicada, apresenta uma tendência significativamente relevante, uma vez que, os resultados exibidos apontam uma variação experimental inferior a 4%. À vista disso, foi constatado que para o alumínio essa taxa foi de  $2,88 \pm 0,05$  N/mg e para o aço,  $1,64 \pm 0,02$  N/mg, aproximadamente. Sendo assim, é sugestível a utilização da taxa de desgaste para prever resultados sob outras condições não expostas no trabalho. Por analogia a equação de Archard (2.1) pode-se pressupor que a taxa poderia satisfazer a constante K de desgaste para o experimento correlacionando para estimar condições de perda de massa no ensaio, restringindo a equação para:  $Q = KW$ , uma vez que, a dureza do material não é alterada. Desse modo, foram obtidas as seguintes equações para o aço:  $Q = 2,88W$  e para o alumínio  $Q = 1,64W$ , considerando W a carga aplicada no ensaio.

As equações empíricas apenas auxiliam na previsão de perda de massa em função da carga aplicada. É claro que é impossível validar a equação, visto que, são limitadas em construírem com precisão o perfil do mecanismo de desgaste ao longo de um estudo, é sugerido que aplique-a em intervalos relativamente pequenos, uma vez que para muitos autores o modelo matemático de Archard não é conciso, já que variações externas podem influenciar o fenômeno.

A figura 4.4 exibe o comportamento para os materiais em relação à perda de massa em função da carga aplicada, com base nisso foi investigada a influência na distribuição de incrementos de carga no fenômeno de desgaste. A análise incremental da aplicação de carga no experimento é exibida na figura 4.5, apresentando o

comportamento do alumínio e aço, respectivamente, em relação à perda de massa em função da carga aplicada, sendo esta distribuída em incrementos, ou seja, em pequenos pacotes de carga uniforme.

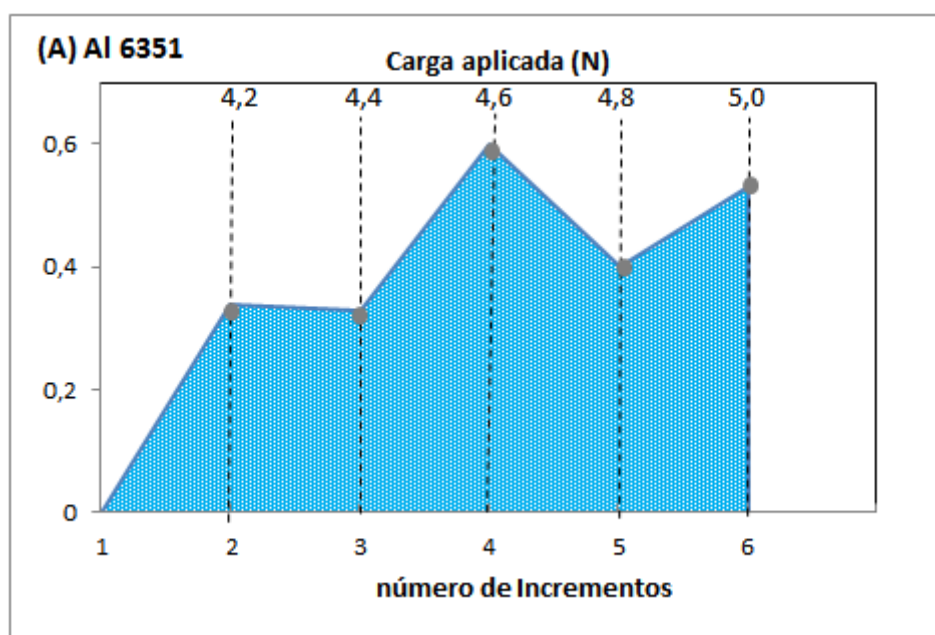
**Tabela 4.8** Perda de massa dos materiais submetidos à carga incremental.

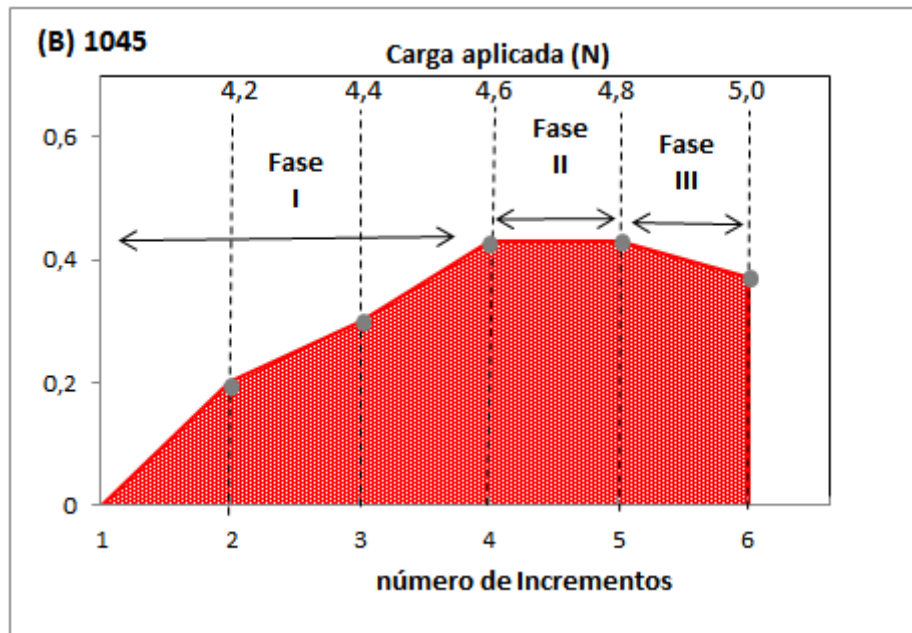
Variação de Carga (N)	Perda de massa	
	Alumínio	Aço 1045
4,2 - 4,0	0,34 ± 0,02	0,20 ± 0,03
4,4 - 4,2	0,33 ± 0,01	0,30 ± 0,02
4,6 - 4,4	0,60 ± 0,01	0,43 ± 0,02
4,8 - 4,6	0,40 ± 0,02	0,43 ± 0,02
5,0 - 4,8	0,53 ± 0,01	0,37 ± 0,02

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Considerando o aumento da carga aplicada uniforme, foi possível analisar o comportamento dos materiais mediante a variação incremental proposta na pesquisa, diante disso, observando a tabela 4.8 nota-se a divergência nos resultados obtidos nos ensaios do alumínio em compensação verifica-se uma tendência de aumento linear da perda de massa em função do incremento aplicado. Com base nas informações da tabela os gráficos da figura 4.5 exibem o perfil do comportamento dos materiais mediante ao incremento das cargas no ensaio.

**Figura 4.5** Perda de massa do aço SAE1045 e Al 6351-T6 em função da variação da carga aplicada.





Onde: A Imagem (A) exhibe os resultados do alumínio e (B) do aço 1045.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.5 exhibe o perfil comportamental dos materiais mediante as parcelas incrementais de 0,2N de carga em cada condição de ensaio. Considerando o aumento de carga no ensaio, foi possível observando o gráfico que o alumínio a perda de massa em relação aos incrementos de carga não produziu um efeito linear (figura 4.5a), não foi possível justificar o efeito observado, contudo, sabe-se que o alumínio apresenta como característica a dureza inferior ao aço, e, conseqüentemente, quando submetido ao ensaio de desgaste abrasivo a deformação plástica se dará de maneira mais clara, podendo oras extrair fragmentos com mais versatilidade oras não, descrevendo esse comportamento não linear, é possível atribuir também o efeito ao pequeno intervalo de carga do ensaio. Todavia sugere-se um aumento da taxa de desgaste em função da carga aplicada.

Observando a ação dos incrementos de carga sob o aço 1045 (figura 4.5b) nota-se a divergência em relação ao comportamento exibido pelo alumínio. Mediante os resultados apontados, foi possível dividir o fenômeno em três fases: A fase I, onde o material descreve um aumento progressivo em relação ao incremento de carga, comportamento já esperado e descrito na literatura. No intervalo entre os incrementos 4 e 5, ou seja, na carga 4,6-4,8N (fase II) observa-se um comportamento linear no que diz respeito a continuidade da influência da carga no ensaio, nesse momento, o aumento de desgaste prossegue, porém de forma degenerativa, ou seja, há uma tendência de redução

da influência da carga no desgaste exibida na fase III da curva, que exibe um início de redução da influência da carga na perda de massa no ensaio. Alguns autores relatam o aparecimento da carga que limita o ensaio, ao que se referem à carga crítica (Hirst e Lancaster) conforme citado por Camilo (2010), e, segundo os resultados experimentais apresentados é possível estipular que a carga crítica para o aço está no intervalo entre as cargas 4,6 e 4,8.

#### 4.3.2. Efeito do tamanho da partícula abrasiva

##### 4.3.2.1. O efeito das lixas abrasivas no ensaio pino-disco

O aço 1045 e a liga de alumínio 6351 foram submetidos ao ensaio abrasivo com lixas contendo diferentes granas com o propósito de investigar a influência do tamanho das partículas abrasivas em relação ao perfil de desgaste nos materiais. Lixas com granulometrias de: #320 (44-53 $\mu\text{m}$ ), #220 (62-74 $\mu\text{m}$ ) e #150 (88-105 $\mu\text{m}$ ) foram usadas conforme descrito na metodologia do estudo. Os resultados experimentais que transcrevem o efeito de diferentes tamanhos de abrasivo são exibidos na tabela 4.9.

**Tabela 4.9** Perda de massa na ação das diferentes granulometrias do abrasivo.

	Perda de massa (mg) na lixa #320 (44-53) $\mu\text{m}$	Perda de massa (mg) na lixa #220 (62-74) $\mu\text{m}$	Perda de massa (mg) na lixa # 150 (88-105) $\mu\text{m}$
Alumínio	10,42 $\pm$ 0,28	12,67 $\pm$ 0,13	16,42 $\pm$ 0,56
Aço 1045	5,21 $\pm$ 0,22	8,56 $\pm$ 0,3	10,11 $\pm$ 0,38

**Fonte:** acervo pessoal (2016).

Observando os resultados exibidos na tabela 4.9 foi possível verificar a significativa influência do abrasivo em relação ao ensaio de desgaste constatando com resultados obtidos em diversos trabalhos disponíveis na literatura: Mondal *et al.* (1998); Das *et al.* (2008); Conrado *et al.* (2009); Sinatora *et al.* (2011); Tressia (2015), entre outros, apontam a influência do tamanho das partículas do abrasivo em relação à resistência ao desgaste. Portanto, ficou evidente a influência que é exercida pelo tamanho das partículas no ensaio, onde o desgaste foi mais intenso em abrasivos que apresentam granulometria superior.

Os dados exibidos na tabela 4.9 foram manuseados para calcular as respectivas taxas de desgaste dos materiais nos ensaios, os resultados foram apresentados na tabela 4.10, subsequente seus valores foram usados para estruturar o gráfico comparativo exibido na figura 4.6.

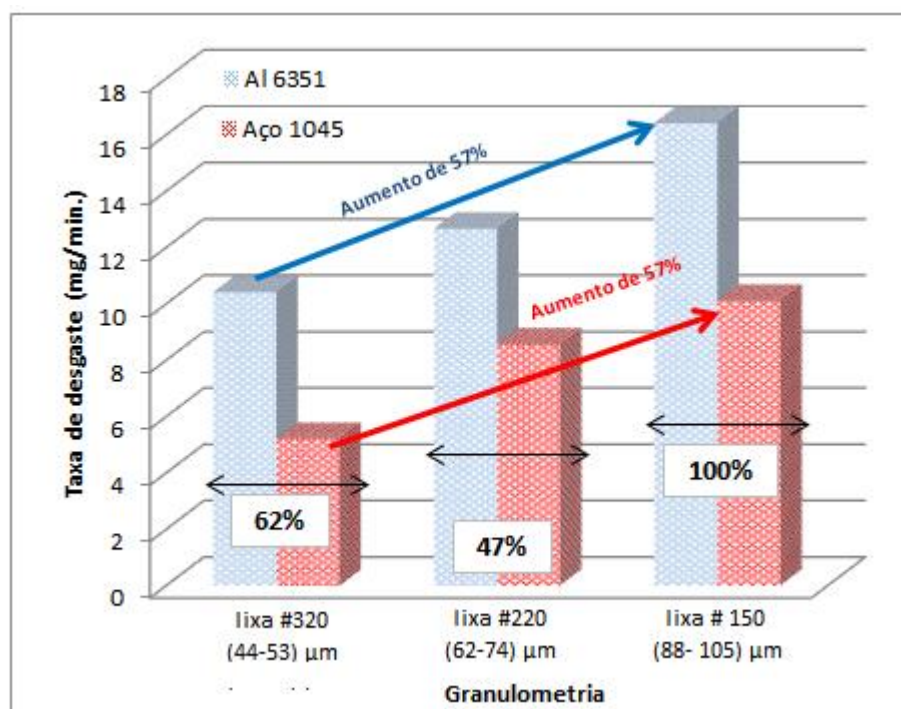
**Tabela 4.10** Taxa de desgaste em diferentes granulometrias.

	Tx desgaste* na lixa #320 (44-53) $\mu\text{m}$	Tx desgaste* na lixa #220 (62-74) $\mu\text{m}$	Tx desgaste* na lixa # 150 (88- 105) $\mu\text{m}$
Alumínio	5,9 $\pm$ 0,16	7,17 $\pm$ 0,08	9,29 $\pm$ 0,31
Aço 1045	2,95 $\pm$ 0,12	4,85 $\pm$ 0,17	5,72 $\pm$ 0,21

Onde - \* é a taxa de desgaste dada em miligramas por minuto.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

**Figura 4.6** Gráfico comparando taxas de desgaste em relação ao tamanho do abrasivo.



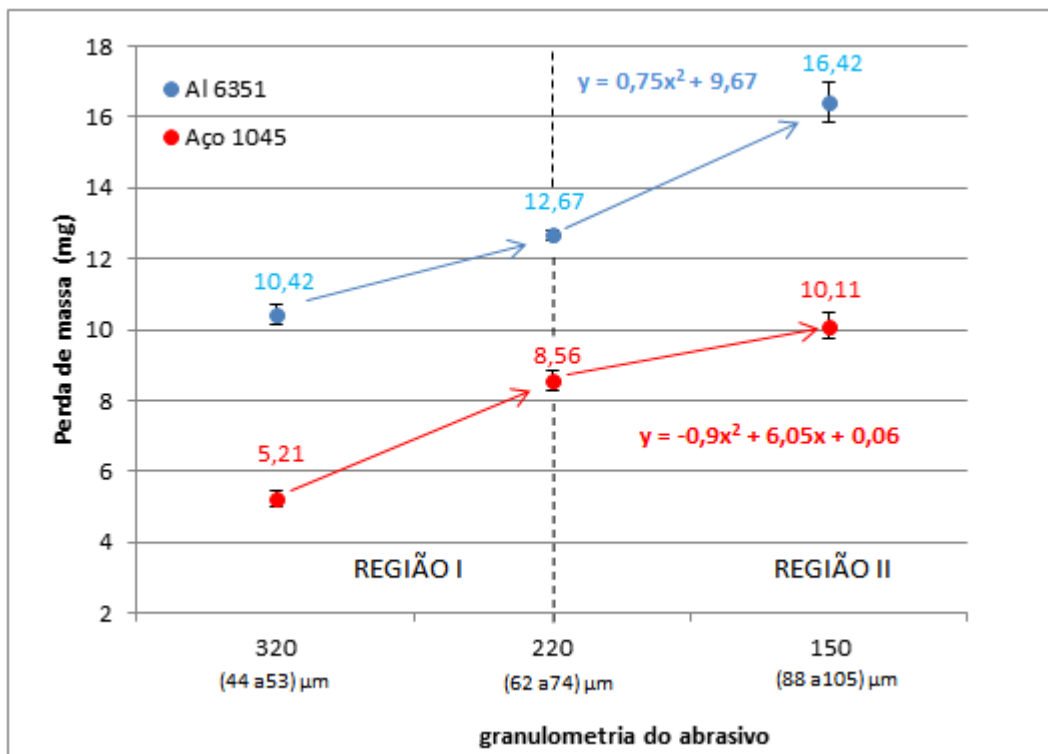
Fonte: Acervo pessoal (2016).

Observando as tabelas 4.8 e 4.9 foi constatado que a variação do tamanho das partículas abrasivas produz um aumento no efeito de desgaste do aço de aproximadamente 94% (lixa #320 em relação a lixa #150), enquanto que o Al 6351-T6 apresentou um aumento do efeito de 57%. Com relação aos efeitos do fenômeno

produzidos entre os materiais observa-se que o alumínio desgasta 62% a mais que o aço, quando submetido a um ensaio com o abrasivo #150, 47% com o abrasivo #220 e chega a atingir 100% em relação ao efeito para o abrasivo #320.

Diversos autores expõem em seus trabalhos que foi possível identificar o TCA, ou seja, o tamanho crítico do abrasivo, cujo efeito atenua o desgaste dos materiais ensaiados. A curva de perda de massa em relação ao tamanho do abrasivo usada é apresentada na figura 4.7, a partir dela foi possível fazer uma análise mais visual da relação com propósito de verificar a possibilidade de identificar o TCA no experimento.

**Figura 4.7** Curvas de desgaste variando a granulometria do abrasivo.



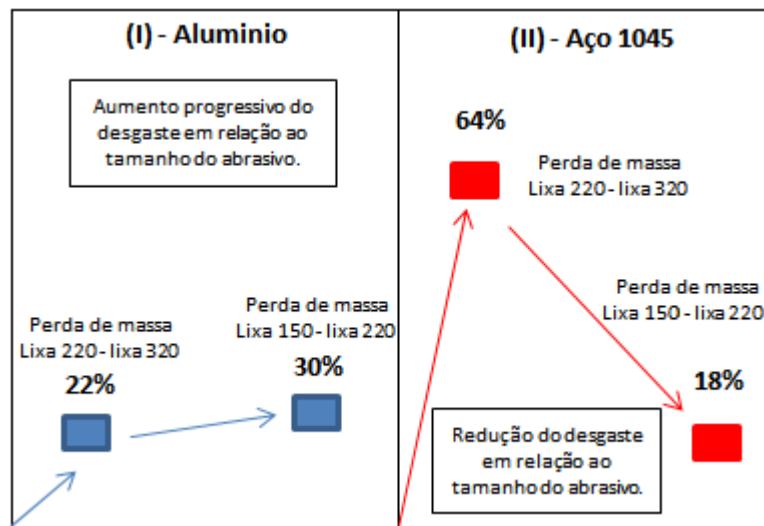
Fonte: Acervo pessoal (2016).

O gráfico da figura 4.6 a princípio evidencia o aumento progressivo do desgaste, ou seja, da perda de massa durante os ensaios para ambos os materiais. Entretanto, na região II foi observada uma queda na inclinação da curva do aço 1045, indicando que a granulometria do abrasivo já não exibe o efeito progressivo para o fenômeno de desgaste, oposto ao observado no alumínio, no qual verificou-se que a mudança de abrasivo não gerou modificações expressivas no comportamento progressivo de desgaste do material no ensaio.

Em relação ao tamanho crítico do abrasivo (TCA) não foi possível constatar, assim como afirma Mondal *et al.* (1998), pois, apenas três tamanhos de abrasivo não são suficientes para admitir o TCA no experimento, entretanto, foi possível observar indícios no aço 1045 examinando a divergência obtida no desgaste do material confrontando diferentes granulometrias e examinando a inclinação da curva, como mostra a figura 4.6.

Os resultados obtidos e exibidos na tabela 4.9 permitiram quantificar a influência do abrasivo no sistema tribológico, em diferentes granulometrias do abrasivo utilizado, a figura 4.8 descreve o efeito para o alumínio e o aço 1045.

**Figura 4.8** Comparativo do efeito do tamanho granulométrico do abrasivo no ensaio.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.8 exhibe o comportamento quantitativo da perda de massa para os materiais, alumínio e aço, ao qual é descrito o percentual de desgaste em função da correlação entre os abrasivos #320/#220 e #220/#150. Ou seja, é a variação de perda de massa, em porcentagem, de um ensaio em relação ao outro. A perda de massa para o alumínio foi progressiva, ou seja, a inclinação da curva permaneceu evoluindo, aumentando de 22% para 30% de perda de massa na correlação entre os ensaios, enquanto que para o aço observou-se uma queda significativa de 64% para 18%.

### 4.3.2.2. Análise experimental x teórico

Após a interpretação dos resultados obtidos experimentalmente foi feita uma análise teórica para transcrever equações que auxiliem na prescrição do comportamento do aço e alumínio em condições não experimentais, ou até mesmo para afrontar resultados teóricos versus experimentais. O *software* Minitab 16 foi aplicado nos conjuntos de dados para assim, com isso foi possível estimar uma equação linear que transcreva o comportamento de cada material, em relação de perda de massa (Pm) em função da variação do tamanho das partículas do abrasivo (A),

$$Pm_{(A\sigma)} = (14,66 \pm 0,02914A) \pm 0,33 \text{ e } r^2 = 98,8\% \quad \text{equação (4.1)}$$

$$Pm_{(Al)} = (21,09 \pm 0,03442A) \pm 0,31 \text{ e } r^2 = 94,1\% \quad \text{equação (4.2)}$$

As equações (4.1) e (4.2) foram utilizadas para comparar os resultados experimentais com teóricos, os resultados empiricamente determinados pelas equações foram exibidos na tabela 4.11.

**Tabela 4.11** ó Valores experimentais x empíricos.

Abrasivo	Aço 1045			Alumínio		
	Exp.	Teor.	Var. %	Exp.	Teor.	Var. %
# 320	5,21	5,34	2,50	10,42	10,08	-3,26
# 220	8,56	8,25	-3,62	12,67	13,52	6,71
# 150	10,11	10,29	1,78	16,42	15,93	-2,98

Onde: Teor. = Valores teóricos obtidos (empíricos) e Exp. = valores experimentais obtidos.

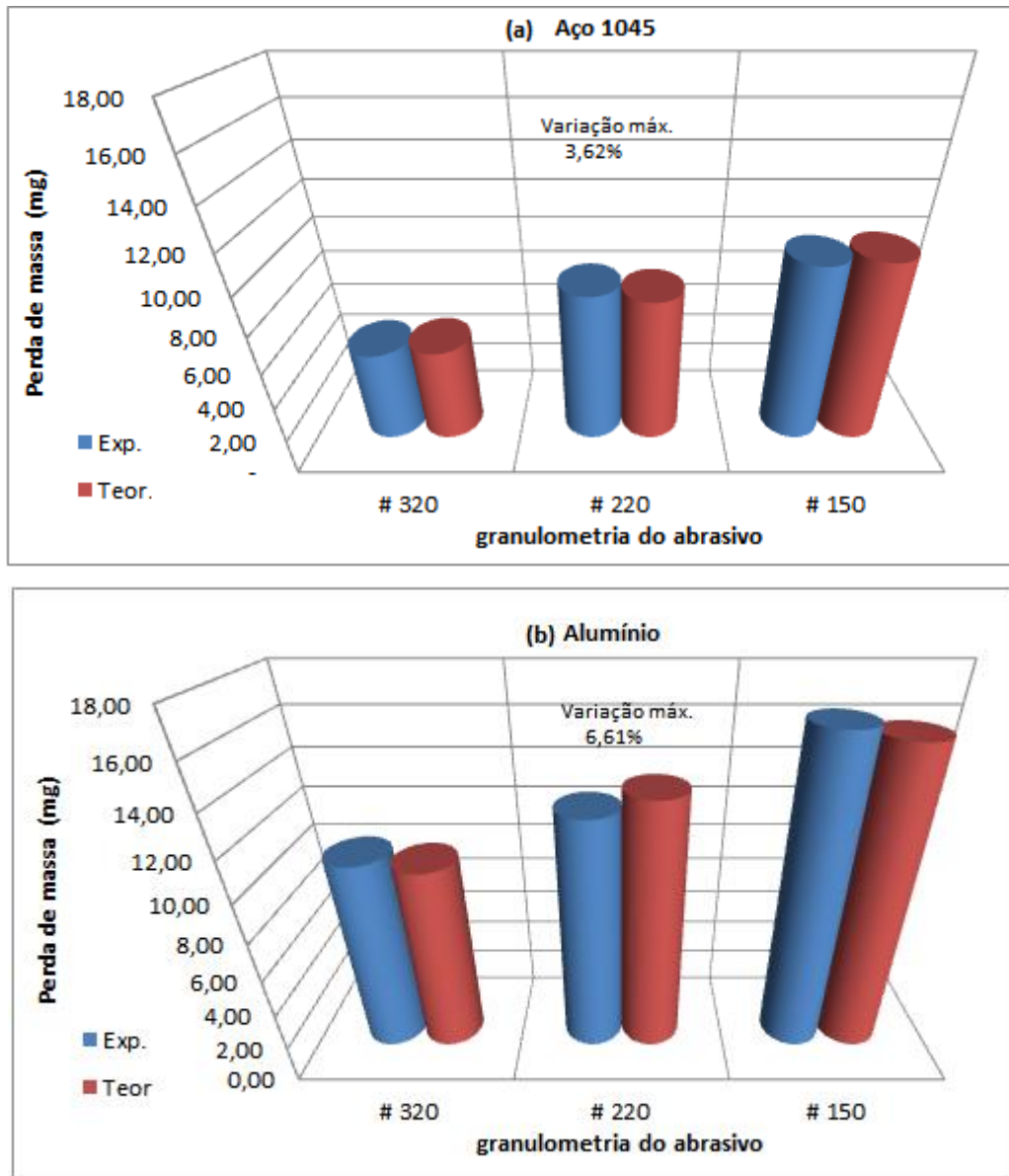
Fonte: Acervo pessoal (2016).

A análise do contraste entre os valores empíricos em relação aos obtidos experimentalmente exibe uma tendência satisfatória para a utilização da equação para prever o comportamento do material sob as condições específicas do ensaio. Ao confrontar os valores empíricos com os experimentais foi possível observar uma pequena variação entre os resultados, no alumínio a variação máxima obtida não excede 7%, à medida que para o aço 1045 esse valor é inferior, aproximadamente 4%.

Os valores empíricos e os experimentais foram transcritos sob curvas, com a perspectiva de confrontar os resultados. A figura 4.9 exibe a analogia entre as condições.



Figura 4.9 ó Comportamento empírico do ensaio em relação ao experimental.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

Observou-se nas curvas apresentadas na figura 4.9 e a tabela 4.11 uma sutil divergência entre o teórico e o experimental, ou seja, o erro que contrasta múltiplas situações já descritas, portanto, as equações satisfazem as condições do ensaio, uma vez que está contemplada no intervalo de variação experimental detectada nos experimentos.

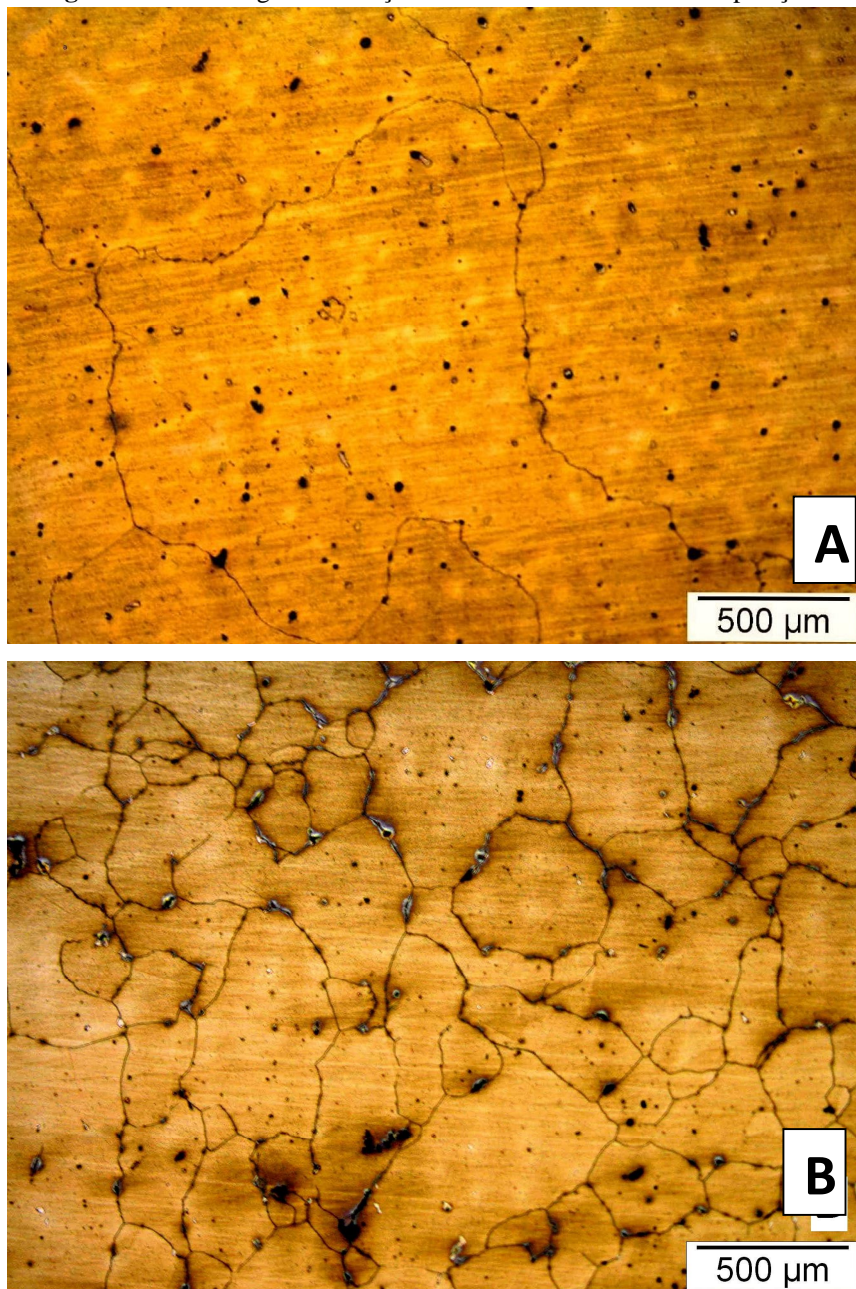
## 4.4. ESTUDO DO AÇO HADFIELD

Esse tópico aborda uma discussão sobre ensaios de desgaste abrasivo em quatro composições diferentes do aço Hadfield.

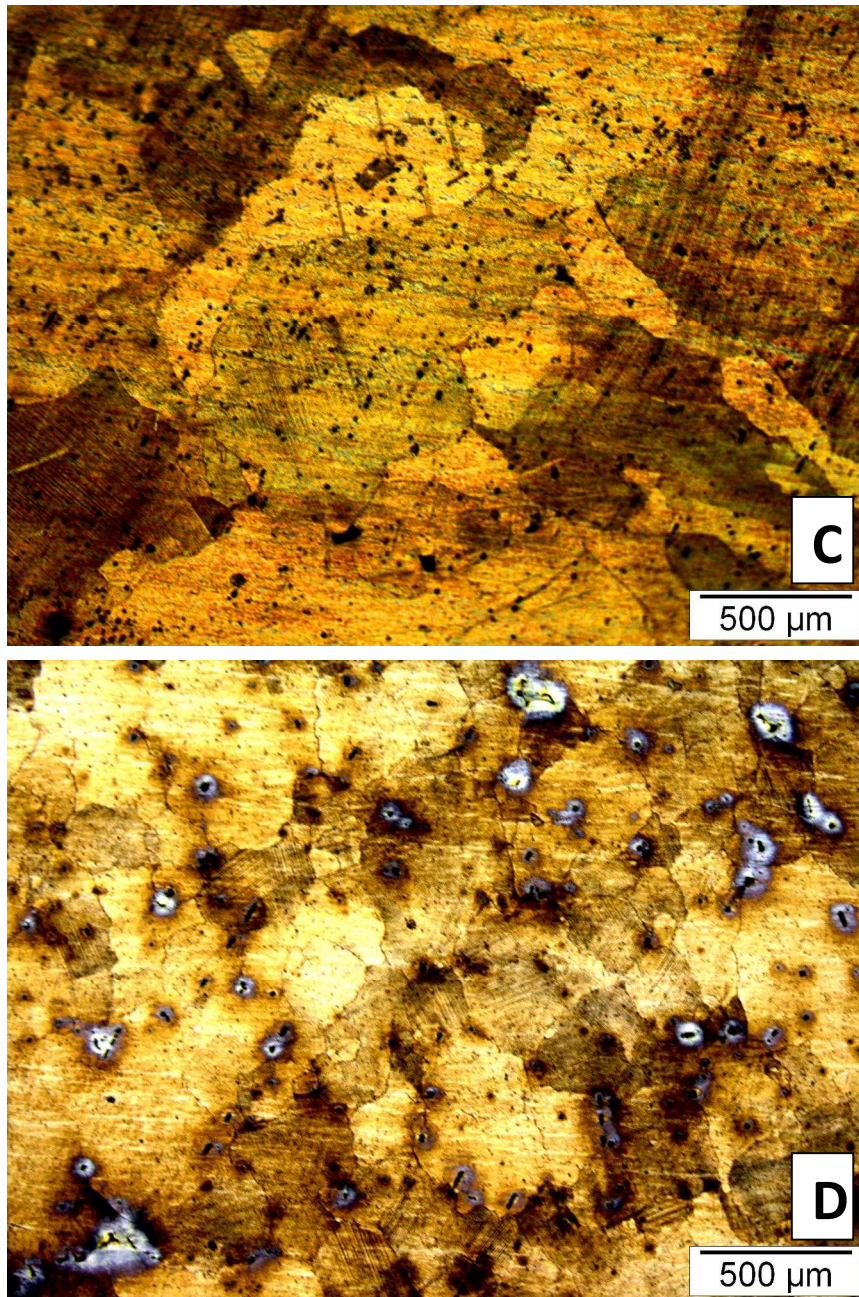
### 4.4.1. Análise da microestrutura

Após o ataque químico com solução de Nital de 4% ocorreram microestruturas feitas das quatro diferentes amostras do aço Hadfield, conforme a figura 4.10.

**Figura 4.106** Micrografia dos aços Hadfield com diferentes composições.







Onde: Aços Hadfield com matriz austenítica atacado com reagente Nital 2 % e com aumento de 50X. (a) ó Aço CB01, (b) ó Aço VL01, (c) ó Aço VL02 e (d) ó Aço VL03.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Com base nas micrografias exibidas na figura 4.10 é possível observar que as microestruturas dos materiais são constituídas de uma única fase de solução sólida com simetria poligonal, tipicamente austenítica e ausência de precipitados formados, porém, observam-se alguns pontos sobre as superfícies, conforme aponta Tressia (2015). Esses pontos são provenientes do processo de fundição da mandíbula do britador em que foram retirados os corpos de prova.

É sabido que as propriedades mecânicas de um aço são influenciadas pelo tamanho do grão do material. À vista disso, pode-se afirmar que um material com grãos menores apresenta maior tenacidade e resistência mecânica quando comparado com um material com grãos grosseiros. Observando as micrografias da figura 5.10 pode-se concluir que o aço Hadfield VL 01 (b) apresenta maior dureza superficial em relação a quatro composições analisadas, e precisamente o material apresentou maior resistência ao desgaste, ou seja, menor perda de massa durante os ensaios.

Observando as imagens obtidas pela microscopia foi constatada uma similaridade entre as imagens (a) e (b) ao passo que (c) e (d) também apresentam tal característica. Essa semelhança pode ser justificada analisando os resultados experimentais obtidos, uma vez que, justamente os aços das micrografias (a) e (b) exibem uma melhor performance nos ensaios de desgaste, ou seja, possuem maior resistência ao desgaste em relação aos outros.

As micrografias (b) e (d) apresentaram o aspecto oxidativo ó visualizado nas imagens ó que, pela análise por EDS, podem se tratar de óxidos, provavelmente formados pelo processo oxidante visível do material. Em (b) foi observado o aspecto em menor proporção.

#### 4.4.2. Identificação de composição química

A composição química dos aços foi quantitativamente foi identificada pela análise de energia dispersiva, os resultados são exibidos na tabela 4.12.

**Tabela 4.12** ó Composição química dos aços Hadfield.

Material	Designação	Composição %					
		C	Mn	Fe	Cr	Si	Al
Aço Hadfield	VL 02	1,00	9,66	71,29	-	1,06	-
Aço Hadfield	VL 03	1,10	10,10	71,50	-	0,80	-
Aço Hadfield	CB 01	1,40	9,66	65,38	1,40	1,34	0,68
Aço Hadfield	VL 01	1,50	9,36	68,92	1,43	1,15	-

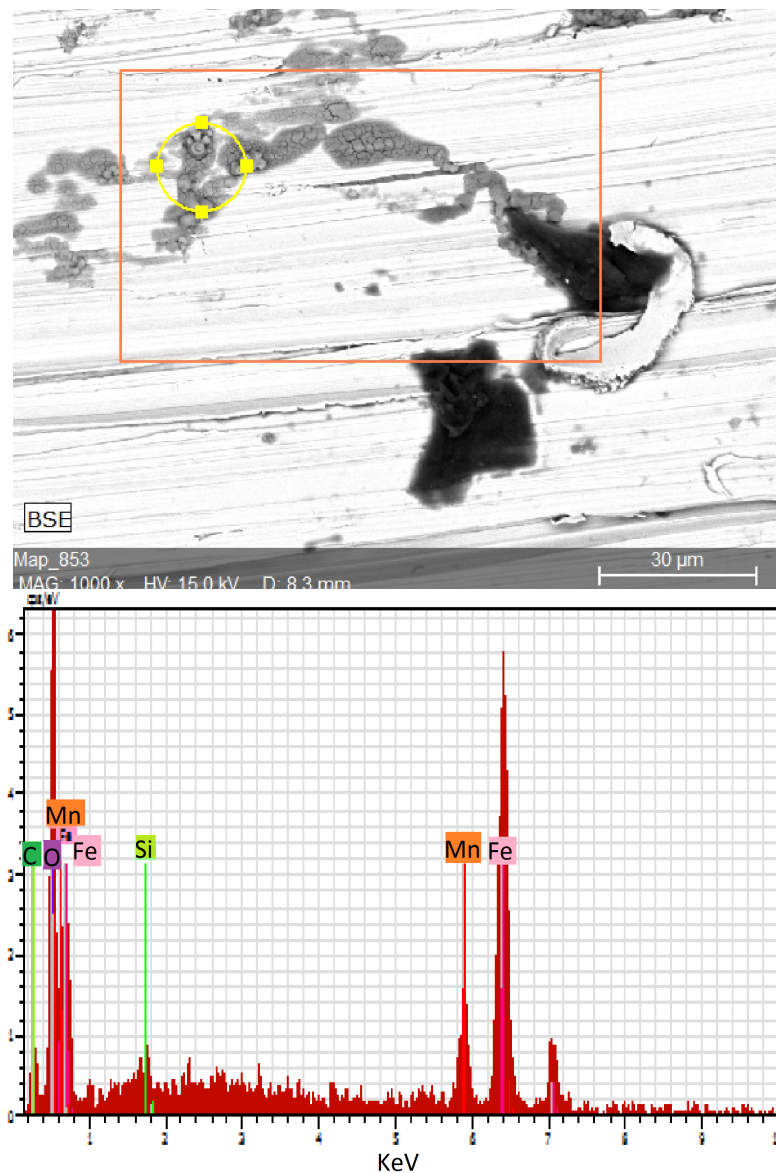
Fonte: Acervo pessoal (2016).

Observando a composição química dos aços exibida na tabela 4.12 e associando com resultados obtidos anteriormente, é possível presumir que o cromo tenha

compactuado nas propriedades dos materiais, uma vez que, segundo Rocha (2011) o elemento químico influencia aumentando a resistência ao desgaste por corrosão do material além de influenciar na dureza dos materiais, e, observando os resultados obtidos no ensaio, justamente o VL01 e CB 01 exibiram uma resistência ao desgaste superior em relação aos demais materiais.

Em relação às micrografias das imagens exibidas anteriormente, foi verificada na imagem 4.10 (b) e (c) uma região que apresentava, pela análise das imagens, uma região escura, similar ao processo oxidante de um material metálico. Para esclarecer o eventual fenômeno, uma análise por energia dispersiva (EDS) foi realizada, a figura 4.11 exibe a micrografia da região e o espectro obtido em sua análise.

**Figura 4.11** Micrografia e espectro obtido por EDS do aço VL 01.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

O espectro exibido na figura 4.11, obtido pela análise por energia dispersiva (EDS), não detectou nenhum elemento químico presente que pudesse interferir na superfície, conseqüentemente, influenciando nos resultados do ensaio. Foram detectados pelo espectro: silício, provavelmente proveniente de resíduos do abrasivo incrustados na superfície do material; manganês, carbono e cromo presentes na composição do aço.

#### 4.4.3. Ensaio de microdureza

A tabela 4.13 apresenta os valores experimentais obtidos para as diferentes composições do aço.

**Tabela 4.13** Média da microdureza para diferentes composições de aço Hadfield.

<b>Aço</b>	<b>Teor de %C</b>	<b>Dureza HV (Inicial)</b>		
VL 02	1,0	236	±	7
VL 03	1,1	245	±	11
CB 01	1,4	254	±	7
VL 01	1,5	310	±	9

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Conforme descreve Rocha (2009), o aço Hadfield apresenta uma dureza inicial de aproximadamente 240 HB. Convertendo<sup>1</sup> os valores de HV para HB é possível verificar que a dureza das diferentes composições do aço Hadfield, quando tabelada, segue a mesma ordem de grandeza descrita por Rocha e Tressia (2015).

Observando a dureza inicial apresentada das diferentes composições e correlacionando com o teor de carbono, nota-se similaridade na relação, maiores teores de carbono, conseqüentemente, maior dureza superficial. A ordem dos dados tabelados segue a ordem decrescente de desgaste dos materiais quando submetidos ao ensaio, ou seja, o VL 02 tem a menor resistência ao desgaste abrasivo, enquanto que o VL 01 apresenta a maior resistência ao desgaste, quando comparado aos outros aços.

<sup>1</sup> - Conversão feita, considerando 10mm bola- C 3000kgf



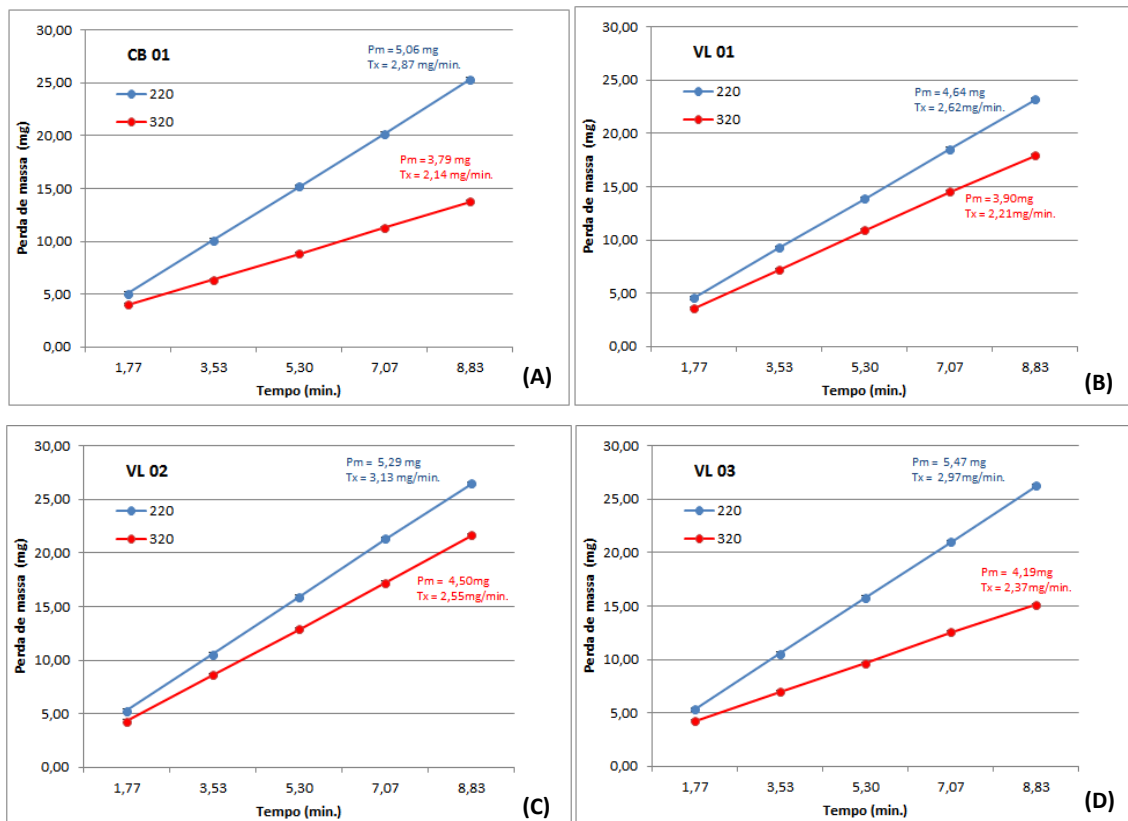
#### 4.4.4. Efeito do tamanho do grão nos ensaios de desgaste no Hadfield

O aço Hadfield foi submetido ao ensaio utilizando lixas com diferentes granulometrias com o propósito de confrontar os efeitos no encruamento e, conseqüentemente, na resistência ao desgaste.

##### 4.4.4.1. Na resistência ao desgaste

Os diferentes tipos de aço Hadfield foram submetidos ao ensaio de desgaste utilizando duas lixas abrasivas #320 e #220. Os resultados são exibidos na figura 4.12.

Figura 4.12 ó Perda de massa acumulativa para diferentes tamanhos de abrasivos.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.12 exibe o desempenho dos aços Hadfield com diferentes composições, submetidos ao ensaio de desgaste fazendo uso de dois abrasivos com granulometrias distintas. Como pode observar o comportamento para todos os materiais é simétrico, ou seja, para as duas condições de ensaio foi possível observar que o desgaste dos aços exibiu as características esperadas, onde o desgaste foi maior para

tamanhos granulométricos superiores, neste caso ocorreu maior perda de massa nas lixas com granulometria de # 220 (62 ó 74  $\mu$ ).

Com base nos dados obtidos nos diferentes ensaios foi possível quantificar a variação do desgaste dos aços em relação às duas condições de ensaio, a tabela 4.14 exhibe os respectivos resultados.

**Tabela 4.14** ó Variação (%) do efeito de diferentes abrasivos no aço.

AÇO	%	Perda de Massa (mg)		
		Carbono # 320 (P1)	# 220 (P2)	(P2 - P1)/ P1
VL 02	1,0	4,33	5,29	29,2%
VL 03	1,1	4,19	5,25	33,5%
CB 01	1,4	3,79	5,06	25,3%
VL 01	1,5	3,59	4,65	22,2%

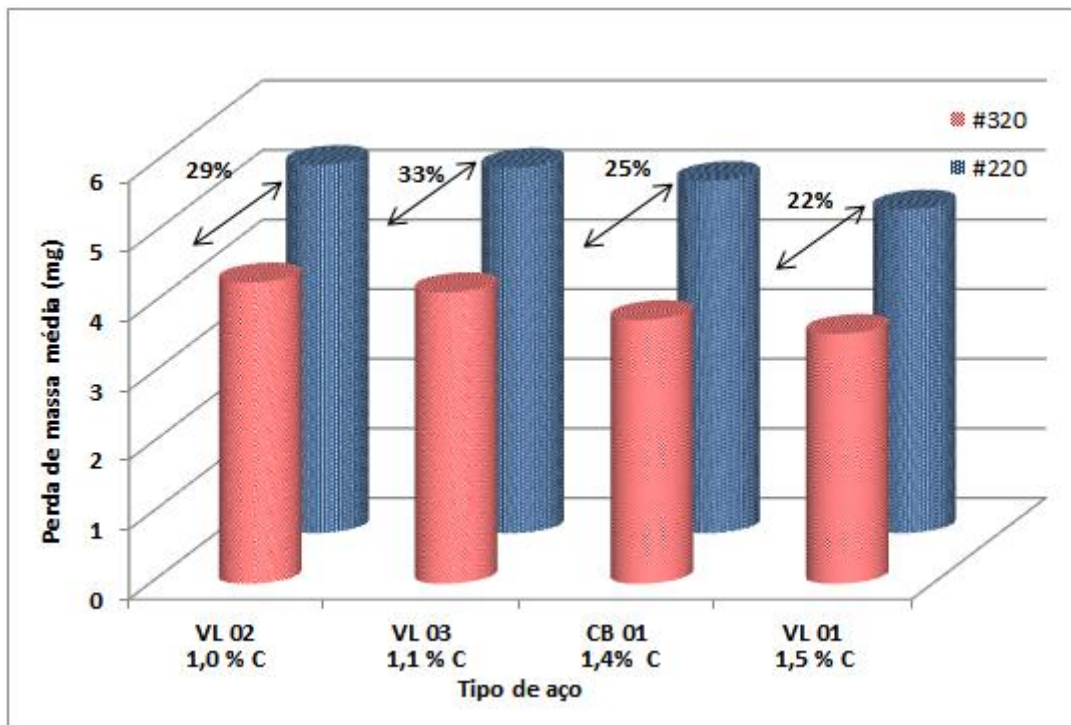
Fonte: Acervo pessoal (2016).

A partir dos dados exibidos na tabela 4.14 foi possível comparar, quantitativamente, os efeitos produzidos quando os materiais foram submetidos a ensaios com granulometrias do abrasivo diferentes. Nota-se o comportamento tendencioso do fenômeno, onde se observou a similaridade durante o ensaio para as diferentes composições do aço exibida ao analisar os resultados obtidos para os diferentes abrasivos, uma vez que se deu de forma crescente. O fenômeno de desgaste ocorre na seguinte ordem: VL02, VL03, CB01 e o mais resistente VL01. Para o ensaio com o abrasivo #320 foi possível observar um caso adverso a qual o VL 03 exibiu uma resistência superior ao CB 01, fato esse, que diverge ao notado no abrasivo #220.

O abrasivo que apresenta características granulométricas maior, nesse caso com a grana #220, desgastou os aços mencionados no intervalo de 22% a 33% em relação à lixa #320, como observado na tabela 4.14.

Os resultados dos ensaios para os aços em ambas as condições abrasivas, conforme exibido na tabela 4.14 é representado na figura 4.13.



**Figura 4.13** Efeito de diferentes abrasivos na perda de massa dos aços Hadfield.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.13 exibe os resultados da tabela 4.14, ao qual correlaciona a perda de massa em função do tamanho do abrasivo.

#### 4.4.4.2. No encruamento

Diversos autores relatam a elevada capacidade de encruamento do aço Hadfield, mediante isso, foi analisada a dureza da superfície do material antes e após o ensaio de desgaste. A tabela 4.15 exibe os resultados da dureza superficial obtidos para os aços submetidos aos ensaios empregando diferentes abrasivos.

**Tabela 4.15** Dureza dos aços Hadfield antes e após ensaios com diferentes abrasivos.

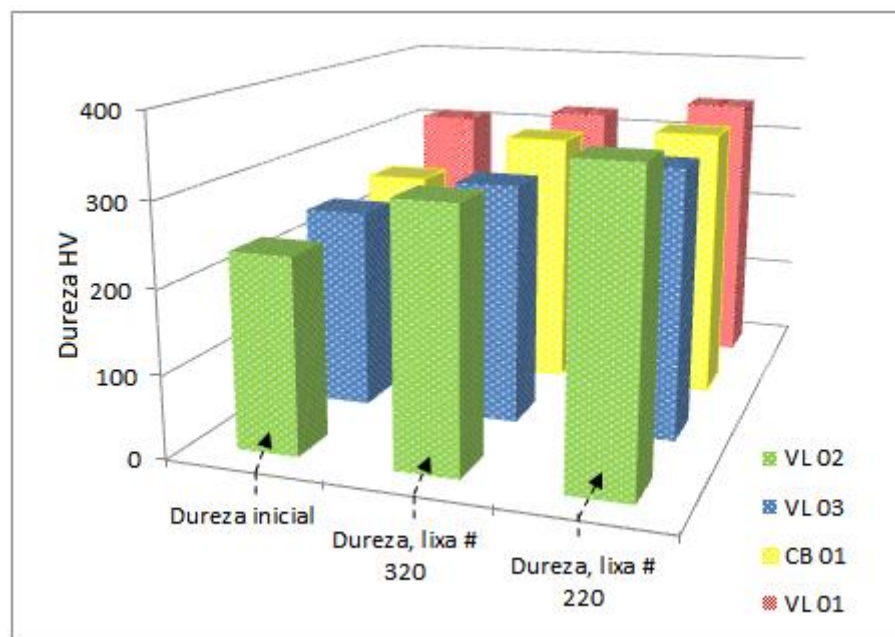
Aço	Teor de %C	Dureza HV (Inicial)	Dureza após ensaio com a lixa #320	Dureza após ensaio com a lixa #220
VL 02	1,0	236 ± 7	310 ± 3	365 ± 3
VL 03	1,1	245 ± 11	292 ± 9	325 ± 9
CB 01	1,4	254 ± 7	317 ± 3	334 ± 3
VL 01	1,5	310 ± 9	324 ± 8	345 ± 8

Fonte: Acerto pessoal (2016).

É observado o aumento na dureza dos aços após o ensaio de desgaste, independente da granulometria do abrasivo utilizado, esse fato é evidenciado em diversos trabalhos disponíveis, autores como, Jost *et al* (1982); Rocha (2009); Atabaki *et al.* (2012); Tressia *et al* (2015); descrevem em suas obras literárias o aumento significativo da dureza superficial após ensaios de desgaste abrasivo do aço Hadfield.

Após os ensaios, independentemente do abrasivo utilizado, houve o aumento significativo da dureza superficial. De acordo com os resultados obtidos e com o mencionado por Tressia (2015), aumentando o tamanho do abrasivo, há um aumento progressivo da dureza superficial. Assim como no trabalho do autor, nesse trabalho é possível observar o mesmo fenômeno. Com base nos resultados da tabela 4.15, a figura 4.14 faz uma correlação entre a dureza antes e pós-ensaio, com a finalidade de verificar o comportamento do aço mediante ao fenômeno de encruamento, e, conseqüentemente, o aumento da dureza do aço.

**Figura 4.14** Relação entre durezas antes e pós-ensaios com abrasivos (# 320 e #220).



Fonte: Acervo pessoal (2016).

Analisando a figura 4.14 constatou-se que o fenômeno de aumento de dureza pós-ensaios dos aços Hadfield ocorreu progressivamente em relação ao abrasivo empregado no ensaio, ou seja, para as condições que os aços foram submetidos ao ensaio com tamanhos de abrasivos, maiores notou-se um aumento mais significativo no mecanismo de encruamento do material aumentando a dureza em relação ao abrasivo de

menor granulometria. Baseando na tabela 4.15 e na figura 4.14, observa-se o aumento de dureza superior para as composições que inicialmente exibiam uma dureza inicial inferior. Com base nas informações, a tabela 4.16 exhibe uma relação entre o aumento de dureza e o tamanho do abrasivo.

**Tabela 4.16** ó Aumento de dureza em função do tamanho do abrasivo.

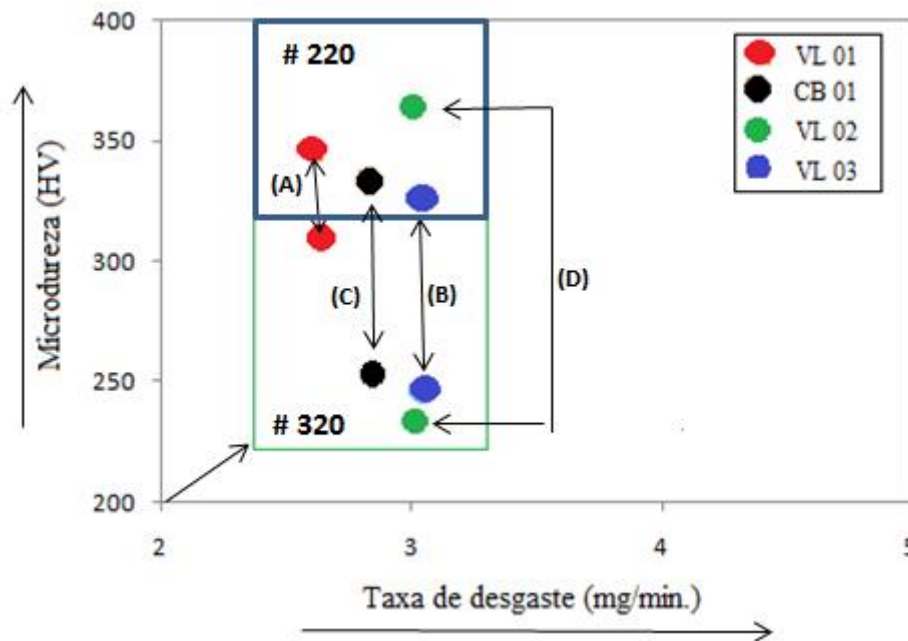
<b>Aço</b>	<b>Teor de %C</b>	<b>Dureza HV</b>	<b>Aumento de dureza inicial e após- lixa #320</b>	<b>Aumento de dureza inicial e após- lixa #320</b>
VL 02	1,0	236 ± 7	31,40%	57,70%
VL 03	1,1	245 ± 11	19,20%	32,70%
CB 01	1,4	254 ± 7	24,80%	31,50%
VL 01	1,5	310 ± 9	4,50%	11,30%

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Examinando os resultados da tabela 5.15, é observado que o fenômeno de aumento de dureza apresentou características tendenciosas. Os aços que, inicialmente, apresentam menores durezas ao longo dos ensaios subestimam os demais, uma vez que, observando os resultados é constatado um aumento significativo de dureza para esses materiais. O VL 02, por exemplo, a princípio exibia a menor dureza entre os quatro materiais ensaiados e, após o ensaio de desgaste usando a lixa #320 foi observado um ganho na propriedade de aproximadamente 32,4% em relação a sua dureza inicial, em contrapartida, o VL 01, que inicialmente exibia dureza de 310 HV, após o ensaio foi visto um ganho de apenas 4,5% em relação a sua dureza inicial. Fato levemente observado independente da granulometria utilizada no experimento, contudo, para a lixa #320 é possível observar uma inconstância na afirmação, uma vez que o CB 01 exibiu características de aumento na dureza superior ao VL03.

A figura 4.15 detalha a relação entre: dureza, tamanho do granulometria do abrasivo e a taxa de desgaste.

**Figura 4.15** Relação entre taxa de desgaste e aumento de dureza por encruamento.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

Pela análise da figura 4.15 foi possível constatar a relação entre desgaste e aumento de dureza, ou seja, materiais mais moles, inicialmente, submetidos ao ensaio de desgaste, apresentam menor resistência mecânica, porém, após ensaios apresentam encruamento a trabalho muito superior em relação aos aços que inicialmente apresentavam maior resistência ao desgaste, esse fato é observado em (B), (C) e (D), enquanto que em (A) foi observado o VL 01, dentre os aços, exibe maior dureza inicial, maior resistência ao desgaste e um efeito de encruamento muito inferior em relação aos outros aços.

Observando os valores em relação ao aumento de dureza dos materiais, tabela 4.16, e comparando com trabalhos mencionados na literatura constatou-se que a elevação da dureza superficial é muito próxima as apresentadas pelos autores. Tressia (2015) observou um aumento de 1,43 vezes, Atabaki *et al.* (2012) obteve o aumento de aproximadamente 1,86, enquanto que nos experimentos com quatro diferentes composições do aço foi encontrado um limite de aumento de dureza superficial de 1,55 vezes.

Diversos autores sugerem respostas para as possíveis causas da elevada capacidade de endurecimento do aço Hadfield quando submetido a impacto ou abrasão em condições de trabalho. De acordo com Spindola *et al* (2010), o encruamento está

relacionado com a fase austenítica, cuja, segundo a autora, apresenta uma baixa energia de falha de empilhamentos, facilitando a formação de falhas de empilhamento, favorecendo a maclação mecânica. O aumento do volume de maclas gera obstáculos ao movimento das deslocções, conseqüentemente, o encruamento.

#### 4.4.5. Influência de teor de carbono

##### 4.5.4.1. No ensaio de desgaste

A tabela 4.17 exibe a relação entre o aço Hadfield com diferentes teores de carbono e os resultados obtidos nos ensaios de desgaste abrasivo.

**Tabela 4.17** Perda de massa e taxa de desgaste variando o teor de carbono do aço.

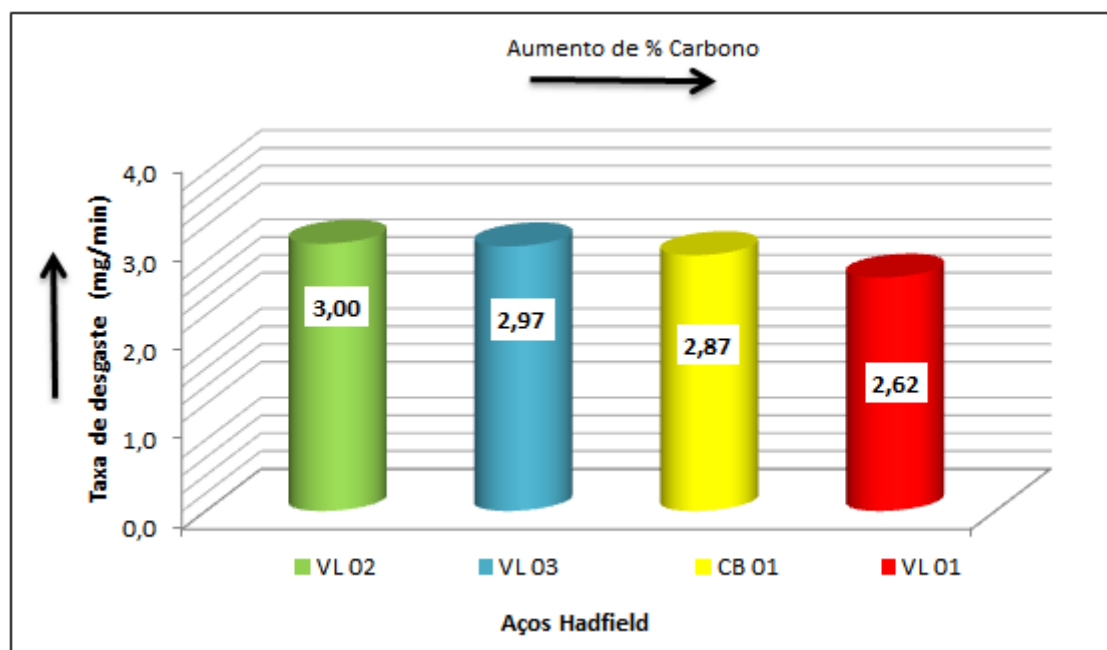
AÇO	% Carbono	% Manganês	PERDA MASSA (mg)	TAXA DESGASTE (mg/min)
VL 02	1,00	9,66	5,29 ± 0,12	3,00 ± 0,07
VL 03	1,10	10,10	5,25 ± 0,12	2,97 ± 0,07
CB 01	1,40	9,66	5,06 ± 0,16	2,87 ± 0,09
VL 01	1,50	9,36	4,64 ± 0,07	2,62 ± 0,04

Considerando o tempo 1,77 min e deslocamento de 16,95 m por ensaio

Teor de manganês obtido experimentalmente por análise de EDS.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Analisando os resultados experimentais obtidos para as diferentes composições do aço Hadfield é possível observar a influência do teor de carbono em relação à taxa de desgaste, uma vez que, foi constatado pelos resultados experimentais que espécimes contendo maior teor de carbono em sua estrutura exibiram maior resistência ao desgaste em relação aos demais, conforme dados exibidos na tabela 4.14, com base na tabela, a figura 4.16 é estruturada, manuseando os resultados para uma melhor compreensão.

**Figura 4.16** Taxa de desgaste em diferentes composições do aço Hadfield.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Com base nos dados experimentais disponíveis na tabela 4.17 é possível afirmar que o aço VL 01 apresenta menor taxa de desgaste em relação aos demais, e, que por analogia, pode-se afirmar que o aço VL 01 é aproximadamente 14% mais resistente ao desgaste em relação ao aço VL 02, 13% ao VL 03 e 9% ao CB 01. Observando a figura 4.16 é possível averiguar a relação entre a perda de massa e o teor de carbono nos ensaios abrasivo do aço.

Os resultados obtidos por Rocha (2011) exibem divergência ao fenômeno observado no experimento, visto que, os resultados não desvelam a influência do teor de carbono, nem sequer do manganês com relação à resistência ao desgaste para diferentes espécimes do aço, talvez outros elementos contidos certamente confirmem o fenômeno. A tabela 4.18 exhibe dados referentes aos resultados experimentais de Rocha.

**Tabela 4.18** Composição de diferentes aços Hadfield e a taxa de desgaste.

AÇO	% Carbono	% Manganês	% Cromo	TAXA DESGASTE (mg/min)
XT 720	1,40	20,50	2,50	9,70
XT 520	1,05	12,75	0,50	11,25
XT 710	1,25	17,75	2,13	11,30
XT 610	1,18	12,60	1,50	12,80

Condições de ensaio:  $v = 33$  m/min,  $C = 4410N$ ,  $n = 50$  rpm e diâmetro do CP = 10 mm.

Fonte: Adaptado de ROCHA (2011).

A tabela 4.18, pertinente aos resultados obtidos por Rocha (2011) exibe em ordem crescente de taxa de desgaste, diante disso, observa-se que o teor do carbono, manganês não exibem influência significativa em relação aos valores experimentais obtidos no ensaio, posto que, foi verificada a relação entre a resistência ao desgaste e o teor de carbono contido na composição do aço. O espécime XT 710 em sua composição exibe 1,25% C, 17,75Mn e 2,13%Cr, apresentando o 2º maior teor de carbono, assim como o Mn e o Cr em relação aos espécimes analisados, exibe a taxa de desgaste semelhante ao aço XT 520, à medida que sua composição aponta teores de C, Mn e Cr inferiores ao XT 710.

Segundo Avery (1954), conforme citado por Rocha (2011) é sugerido um teor de carbono e manganês combinados, de modo que, não ocorra interferência nas propriedades do aço, e, conseqüentemente modifique a resposta do material á resistência ao desgaste. Jost e Schmidt (1986) também descrevem o efeito dos constituintes, posto isso, em ambos os trabalhos são evidenciados vestígios de tal efeito. Avery sugere teores no intervalo de 10-12% de manganês, à medida que Jost e Schmidt apresentam resultados mais significativos entre 6-8%.

A influência do teor de carbono de acordo com Mazar (2012) está intimamente relacionada com a adição de manganês em microestrutura austenítica. Segundo o autor, o manganês auxilia na mobilidade dos átomos de carbono na estrutura CFC e, conseqüentemente, na formação de carbeto de manganês, aumentando o encruamento do material, produzindo, assim, um efeito de aumento na resistência ao desgaste. Portanto, o efeito de aumento de resistência ao desgaste está ligado à sinergia dos dois elementos químicos, contudo não foi possível constatar tal efeito ao longo dos resultados experimentais obtidos no ensaio, porém é necessário caracterizar a composição química do aço empregando outras técnicas com mais preço.

Comparando os resultados experimentais e a ideias expostas pelos autores, é possível presumir a existência da relação entre a taxa de desgaste e o teor de carbono contido no aço, uma vez que, houve uma tendência ao aumento da resistência ao desgaste dos aços contendo teores mais significativos de carbono, conforme é exibido nos resultados apresentados.

#### **4.4.5.2. No mecanismo de encruamento do aço.**

Como mencionado anteriormente, e com base observando os resultados experimentais exibidos na tabela 4.16, é verificado uma relação entre o aumento de dureza da superfície das diferentes composições do Hadfield, uma vez que, o fenômeno mostrou que para os aços que exibem em sua composição menores teores de carbono o aumento foi superior em relação aos aços que apresentaram maiores teores, como, por exemplo, o VL, que em sua composição, comparando entre os aços, apresentou o menor teor de carbono, cerca de 1%, entretanto, em relação ao efeito de aumento de dureza notou o aumento mais significativo em relação aos demais, uma vez que, para a o abrasivo # 320 o aço exibiu aumento de dureza de 31% enquanto que o VL 03, CB 01 e VL 01, exibiram 39,2%, 24,8% e 4,5% e apresentavam teores de carbono de 1,1; 1,4 e 1,5 respectivamente. O fenômeno transcorreu da mesma forma quando foi observado para o abrasivo #220.

Ao relacionar o desgaste observado, o teor de carbono e o fenômeno de aumento de dureza mecânica, é possível estabelecer que quanto menor o teor de carbono, maior o desgaste gerado durante o ensaio, e assim, maior a proporção de encruamento no aço, ou seja, maior relação de aumento de dureza superficial: início-fim.

#### **4.4.6. Relação entre tamanho de grão e o efeito de desgaste no ensaio**

As imagens das micrografias dos aços exibidas na figura 4.10 mostram duas condições diferentes dos aços, sendo que para os aços VL 01 e CB 01 foi observado menores tamanhos de grãos e homogeneidade em relação aos demais. Sabe-se que o tamanho de grão influencia nas propriedades mecânicas do material, uma vez que, grãos adjacentes exibem um contorno de grão em comum, e, diferentes orientações cristalográficas. Durante uma deformação plástica, o movimento das discordâncias ocorre no contorno de grão, que funciona como uma barreira ao movimento. Dessa forma, para que ocorra a movimentação da discordância de um grão para o outro, será necessário alterar sua direção, dificultando seu movimento ao longo do aumento de desorientações pelo seu caminho.

O tamanho dos grãos e sua orientação podem justificar a elevada dureza e resistência mecânica do aço, posto que, um material com grãos menores, exibirá maior dureza e resistência mecânica em relação a outro material com grãos grosseiros, uma



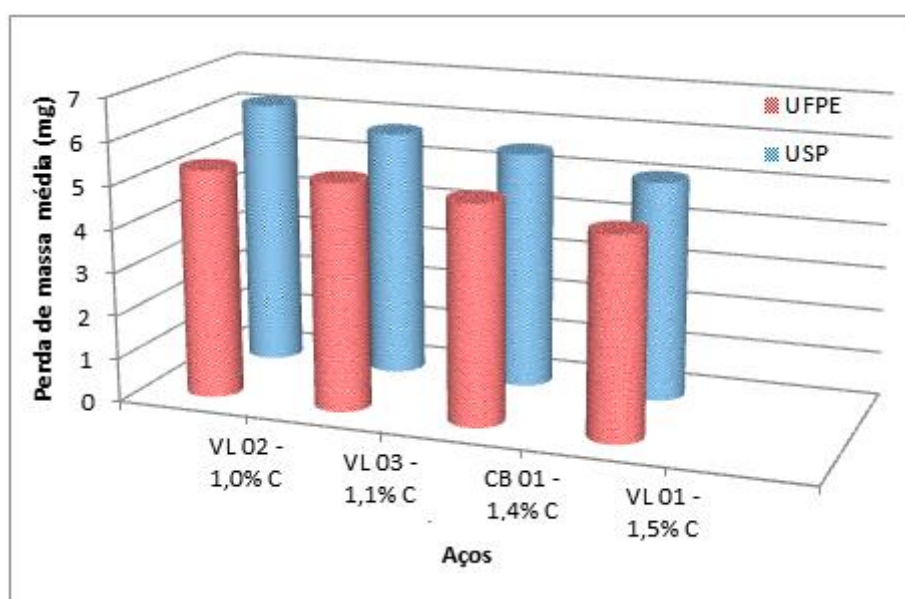
vez que, menores tamanhos de grão resultam em um maior número de contornos de grão, ou seja, aumento de barreiras ao movimento das discordâncias. Fazendo uma analogia dos resultados obtidos ao fenômeno observado, foi possível presumir uma justificativa dos efeitos observados nos aços, uma vez que, como citado anteriormente, os aços VL 01 e CB 01 apresentam menores tamanho de grãos, que resultaram em uma dureza superior em relação aos outros, vide tabela 15, conseqüentemente maior resistência mecânica (tabela 4.14), menor desgaste, menor o movimento das discordâncias e menor o efeito de encruamento nos aços em relação ao VL 02 e VL 03.

#### 4.4.7. Discussão acerca dos resultados obtidos pela USP

Em relação aos resultados obtidos dos ensaios reproduzidos na USP, foi observando uma tendência semelhante ao efeito de desgaste para os materiais, vide figura 4.2 (c-f), em que o efeito do carbono nos aços aumento indicou equivalência no desgaste. Ou seja, maiores teores, mais resistência ao desgaste. Quanto ao intervalo de variação experimental foi observada, em torno de 8% a 16%, vide tabela 4.4.

Em relação aos intervalos de incerteza de medição referentes à perda de massa nos ensaios realizados na UFPE e na USP ó apresentados na tabela 4.4 ó mostram que em todas as situações descritas, os resultados não satisfizeram os intervalos de medição. Os dados exibidos na tabela 4.4 para os aços Hadfield estão expostos na figura 4.17.

**Figura 4.17** ó Comparação entre aços Hadfield, realizados na UFPE e na USP.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

Tabela 4.19 Perda de massa no ensaio para instituições.

Aço/ % Teor de carbono	Perda de massa (mg)	
	UFPE	USP
VL 02 - 1,0% C	5,29	6,18
VL 03 - 1,1% C	5,25	5,72
CB 01 - 1,4% C	5,06	5,48
VL 01 - 1,5% C	4,64	5,07

Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 4.18 exibe as curvas de perda de massa para os aços, comparando as tendências individuais para o perfil dos resultados obtidos na UFPE e na USP. Visualmente, nota-se uma simetria na ordem da sequência de perda de massa entre os resultados obtidos pelas instituições, sendo assim, foi observado essa sequência CB 01, VL 01 e VL 03 sob ordem decrescente de desgaste, para ambas instituições, vide tabela 4.19.

Os dados apontados durante o experimento-tabela 4.19- mostram que, apesar da semelhante ordem de desgaste produzido nos aços, a perda de massa para os aços VL 02 e CB 01 nos ensaios na USP exibiram desgaste superior ao aço VL 02-aço com maior perda de massa, próximo de 8% e 3%, aproximadamente.

Foi possível identificar uma variação significativa referente aos resultados obtidos pelas diferentes instituições e que o aço VL 02 apresenta maior variação experimental atingindo-cerca de 17%-, enquanto que para os outros aços VL 01, VL 02 e CB 01 essa variação está no intervalo entre 8-9%.

#### 4.5. Caracterização dos mecanismos de desgaste por análise de micrografias

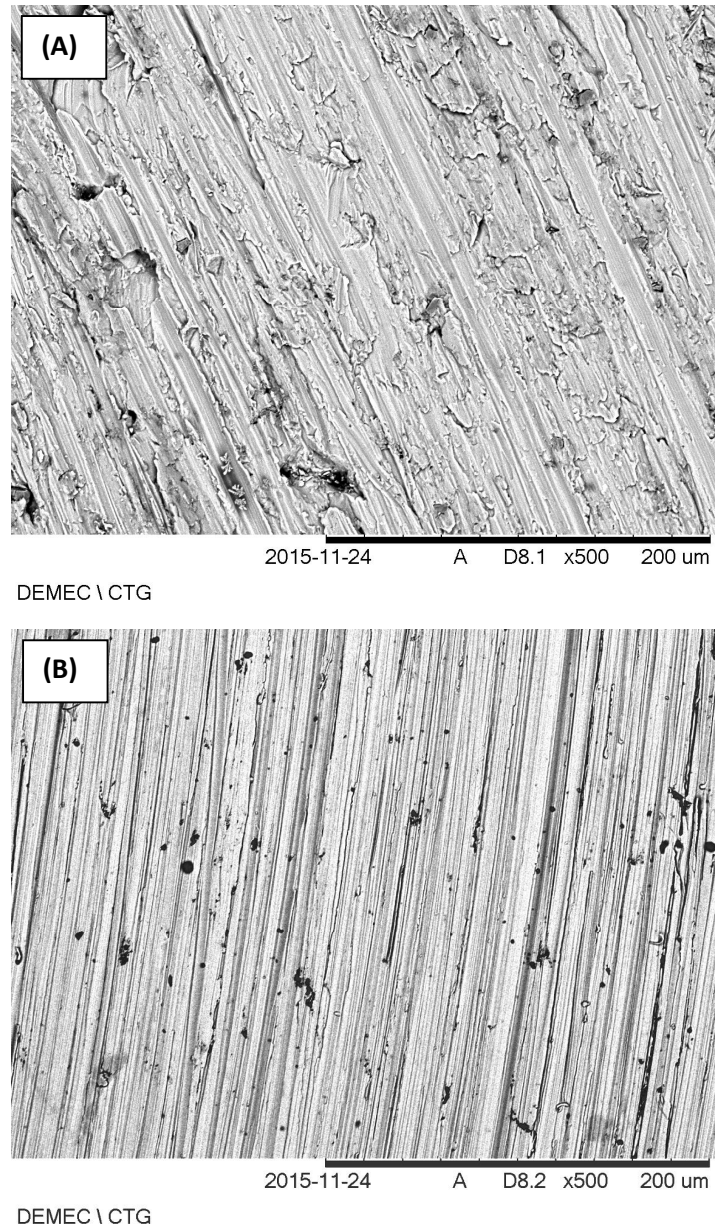
As superfícies de desgaste das amostras foram analisadas por micrografias obtidas no MEV para identificar os micromecanismos de desgaste dos materiais.

##### 4.5.1. Superfície de desgaste entre diferentes materiais

Foram feitas análises por micrografias de materiais que apresentam estruturas similares ó CCC ó, porém, há uma diferença substancial na dureza, o alumínio que

exibe dureza aproximadamente três vezes inferior ao aço Hadfield, como apresentam as micrografias exibidas dos diferentes materiais na figura 4.18.

**Figura 4.18** Micrografias das superfícies desgastadas, Al e VL 01.



Onde: micrografias do (a) alumínio e (b) aço VL 01, para o tamanho do abrasivo #220.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

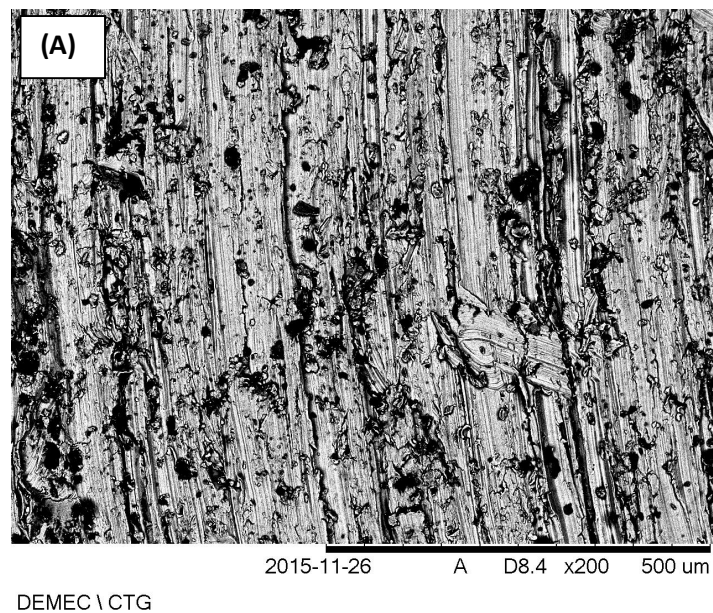
Analisando as imagens obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (figura 4.18) após os materiais-alumínio e aço Hadfield serem submetidos ao ensaio de desgaste abrasivo utilizando a lixa com granulometria #220, foi observado que a superfície do alumínio (A) mostra uma severa deformação plástica sob um aspecto irregular e desorientado. Segundo Coronado (2011), são riscos mais profundos

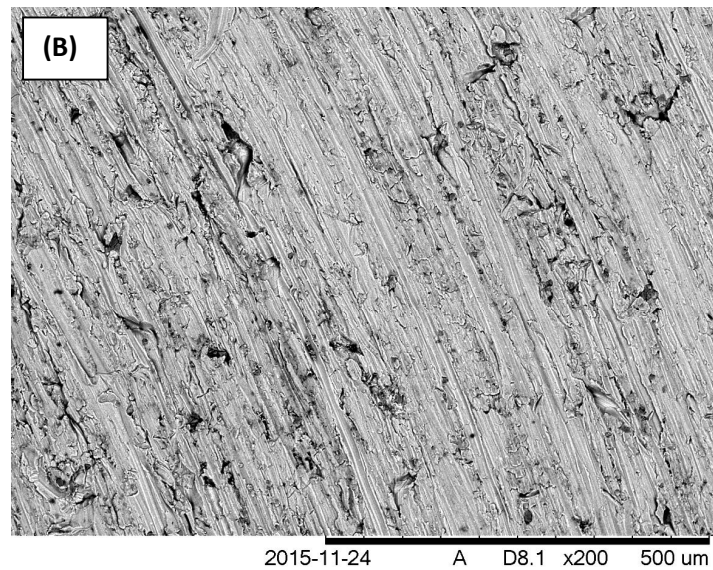
justificados por sua dureza inferior. Por conseguinte, analisando o aço Hadfield VL 01 ó imagem B ó são observados riscos regulares e contínuos em relação ao alumínio (A).

#### 4.5.2. Superfície de desgaste entre diferentes lixas e mesmo material

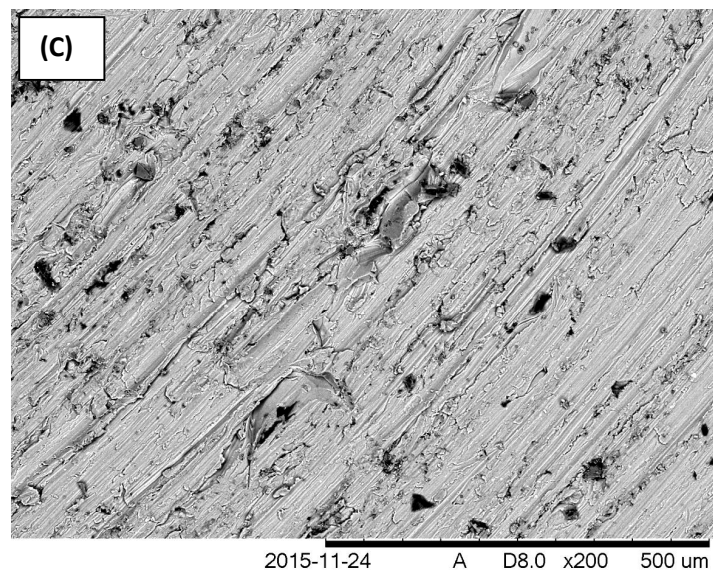
Foram feitas análises por micrografias dos materiais variando a granulometria do abrasivo utilizada para evidenciar o mecanismo na superfície com maior nitidez. Foram analisadas as micrografias do alumínio para as lixas abrasivas #150 (88 - 105 $\mu$ ), # 220 (62-74 $\mu$ m) e #320 (44-53  $\mu$ m), conforme as imagens apresentadas na figura 4.19.

**Figura 4.19** ó Micrografias do alumínio em diferentes abrasivos.





DEMEC \ CTG



DEMEC \ CTG

Onde: micrografias do alumínio submetido a lixa (a) #150, (b) #220 e (c) #320.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

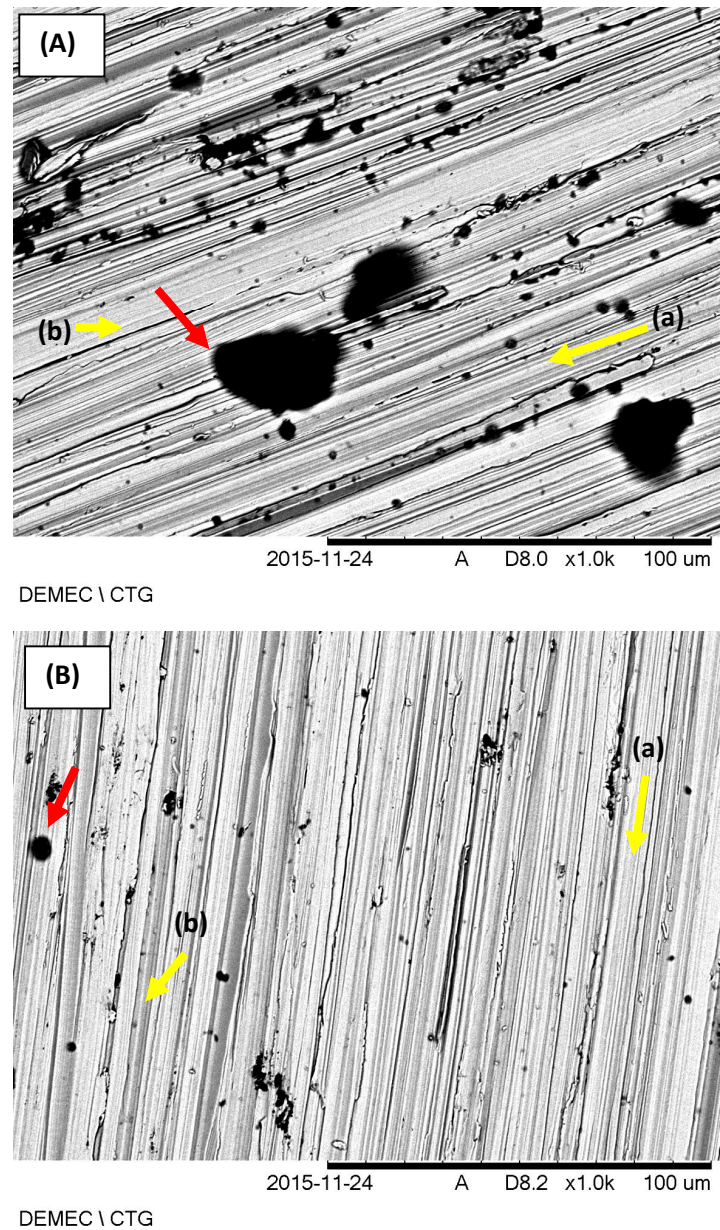
Pelas imagens das micrografias exibidas na figura 4.19, foi possível verificar o efeito do tamanho do abrasivo na superfície de desgaste. Ao confrontar as imagens (a) e (b) ou (c), foi observado que a superfície do material apresentou uma deformação mais severa em relação às outras superfícies, justificado nos resultados obtidos no ensaio, onde, o desgaste foi superior no material submetido a lixa com granulometria maior.

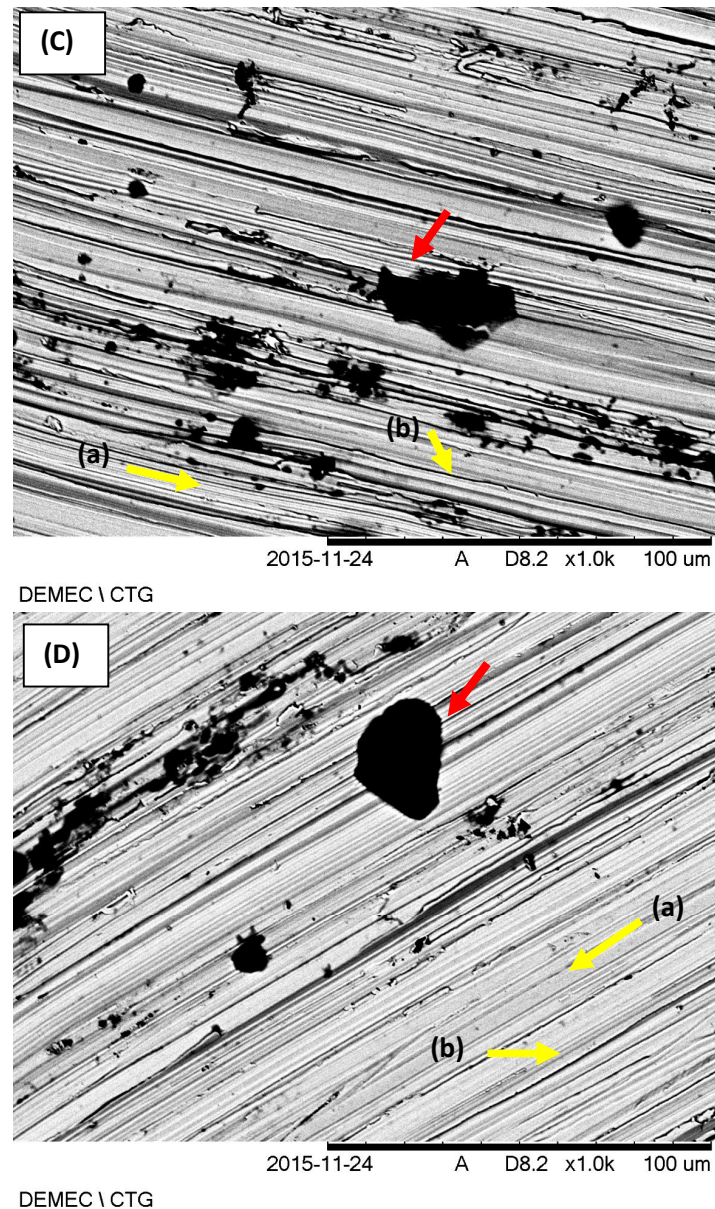


### 4.5.3. Superfície de desgaste variando a composição do aço Hadfield

Foram feitas análises por micrografias das quatro composições dos aços Hadfield utilizando-se a lixa abrasiva com granulometria de # 220 (62-74 $\mu$ m), conforme as imagens apresentadas na figura 4.20.

Figura 4.20 ó Micrografias das diferentes composições do aço Hadfield.





Onde: micrografias do aço Hadfield o abrasivo# 220, (a) CB 01, (b) VL 01, (c) VL 02 e (d) VL 03.

Fonte: Acervo pessoal (2016).

Com base nas micrografias dos aços Hadfield exibidas na figura 4.20, foi observado que para todos os aços o aspecto da superfície de desgaste foi semelhante, apresentando riscos regulares em toda a região.

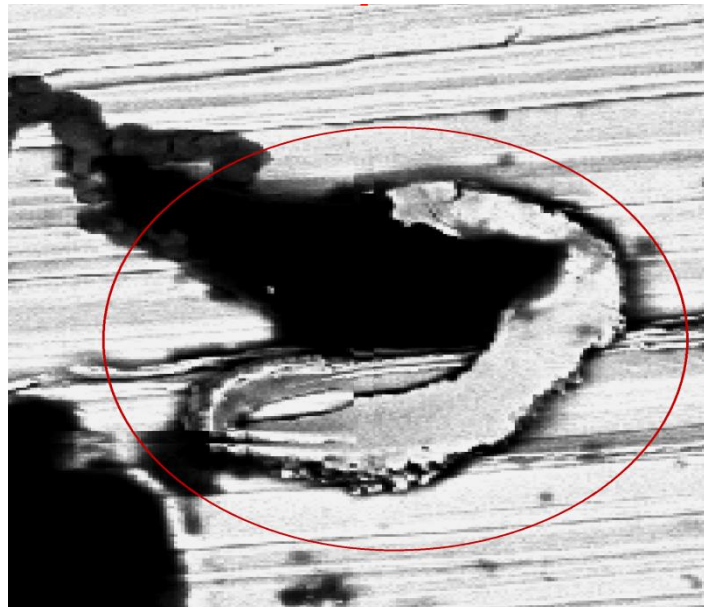
Foi possível analisar na superfície uma região escura indicada pela seta vermelha, foi observando efeito similar em trabalhos (Pintaúde, 2002; Coronado, 2011; Tressia, 2015). Segundo Pintaúde, se tratava de cavidades oriundas da extração de fragmentos do aço pelos grãos do abrasivo, Coronado identificou que eram pequenos fragmentos do abrasivo, ou seja, grão que ficaram sob a superfície do aço, com base no argumento verificado por Coronado, é possível confirmar que as regiões visualizadas

nas imagens exibidas na figura 4.20 são relativas a fragmentos encrostados na superfície do aço oriundos da lixa, fato esse observado ao analisar o EDS, onde foi detectado nas regiões o elemento silício e oxigênio, constituintes da sílica,  $\text{SiO}_2$ , descrito anteriormente na figura 4.11.

Com relação ao comportamento da superfície dos aços, assim como, descreveu Tressia (2015) em seu trabalho foi possível observar nas micrografias exibidas nas figuras 4.10, tais informações referentes ao mecanismo de desgaste: (a) a direção do deslizamento, (b) riscos mais profundos, provavelmente provenientes de algum grão incrustado na superfície do material ou devido ao movimento oposto da lixa proveniente de folgas em sua fixação no disco, além dos fragmentos ao longo da superfície do aço, já mencionados (seta vermelha).

Após a análise das superfícies é possível observar a presença de formação de sulcos e cavacos sob a superfície de desgaste, características de dois micromecanismos de desgaste, sendo eles o microsulcamento e o microcorte, assim como visto no trabalho de Tressia (2015). Foi possível confirmar a presença de cavacos na superfície do material (figura 4.21).

**Figura 4.21** Imagem da micrografia do aço VL 01.



Fonte: Acervo pessoal (2016).

A micrografia exibida na figura 4.21 é possível observar o fragmento do abrasivo aderido à superfície do aço VL 01 e o cavaco extraído proveniente da superfície do material desgastado.



## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSÃO

#### 5.1. Conclusão do objetivo geral

Ao final da pesquisa, conclui-se que o dispositivo do tipo pino-disco montado exibiu boa reprodutibilidade nos ensaios. Posteriormente, para avaliar sua reprodutibilidade, foram realizados ensaios em que os resultados encontrados foram confrontados com valores experimentais obtidos por um laboratório externo (USP) para fins comparativos. E, finalmente, o aço Hadfield, o qual, a partir de ensaios de desgaste abrasivo realizados em aços com diferentes teores de carbono, demonstrou a influência do elemento. Quanto à determinação do encruamento, quando o aço foi submetido ao ensaio apresentou o comportamento semelhante aos descritos na literatura. A partir disso, foi possível inferir as seguintes elucidações:

#### 5.2. Conclusão sobre os objetivos específicos

- A variação experimental obtida através de comparação com resultados obtidos sob mesmas condições em um laboratório externo (USP) apontaram uma disparidade significativa, alcançando valores que podem chegar a 16%;
- O erro experimental nos ensaios realizados na UFPE em média foi inferior a 5%, como pode ser observado nas tabelas do apêndice.
- Quanto ao comportamento tribológico dos materiais (Al 6351 óT6 e Aço SAE 1045) notou-se uma influência significativa em relação ao tamanho do abrasivo: teve-se maior desgaste no ensaio nos casos em que se tinham maiores abrasivos. Observa-se que na mudança da grana do abrasivo para o aço SAE 1045 (#320 para #150) houve um aumento de 94% na perda de massa, enquanto que para o Al 6351-T6 foi observado 57%;
- Foi possível observar o efeito de diferentes carregamentos sob o aço SAE1045, alumínio 6351-T6, onde, foi possível também verificar o aumento progressivo na perda de massa em função do aumento da carga aplicada. Ao aumentar o equivalente a um Newton (1,0N) no experimento, observou-se o aumento de

perda de massa durante o ensaio de, aproximadamente, 18% para o alumínio e 26% para o aço;

- A variação do teor de carbono no aço Hadfield, de acordo com os resultados experimentais obtidos, influenciou na resistência ao desgaste do material, uma vez que, observou-se uma redução de perda de massa, ou seja, aumento na resistência ao desgaste nos materiais que em sua composição apresentavam-se com maiores teores de carbono, independente das condições abrasivas empregadas.
- Foi possível evidenciar o processo de encruamento do aço Hadfield, visto que, em todas as composições do aço, foi possível observar um aumento significativo da dureza superficial. Entretanto, esse fenômeno apresentou o efeito mais significativo em aços contendo composições inferiores de carbono, justamente os aços que apresentaram uma maior perda de massa no ensaio. Esse efeito ocorreu sob as duas condições abrasivas, observando uma discreta tendência em ambas as condições para o efeito mencionado. No entanto, para a condição do abrasivo #320, houve uma oscilação entre os resultados obtidos, uma vez que o aço CB 01 apresentou um encruamento superior ao aço VL 03;
- Quanto ao micromecanismo da superfície de desgaste, foi possível prognosticar a formação de microsulcos e microcortes provenientes do efeito do desgaste abrasivo. Quando comparadas as imagens micrográficas dos aços Hadfield sob a ação de diferentes abrasivos, foi possível distinguir sem grandes esforços, seus efeitos individuais.

### **5.3. Trabalhos futuros**

- Avaliar o efeito da carga aplicada e se existe alguma correlação linear que explique o efeito do desgaste no aço Hadfield, considerando que se tenha uma carga fixa e a adição de pequenas parcelas de carga.
- Verificar a influência da velocidade rotacional e linear durante o ensaio de desgaste do aço Hadfield.
- Identificar o tamanho crítico do abrasivo (TCA) no aço Hadfield.
- Determinar a relação  $H_a/H$  permitindo, assim, definir a relação entre o tamanho do abrasivo e a severidade gerada pelo mesmo sob a ação durante o ensaio do

aço Hadfield. Para isso, é necessário medir a granulometria do tamanho das partículas abrasivas dos utilizadas e com isso descrever a relação.

- Avaliar a influência da condição de lubrificação durante ensaios com aço Hadfield.
- A fim de auxiliar no controle dos parâmetros relacionados ao conjunto de condições para execução dos ensaios no dispositivo, sugere-se a automação do equipamento. Para tanto, propõe-se aquisição de sensores de monitoramento, que, acoplados a um software, poderão aumentar a confiabilidade dos parâmetros adotados nos ensaios.

## CAPÍTULO VI

### 7. REFERÊNCIAS

ALBERTIN, EDUARDO. Desgaste abrasivo. Rio de Janeiro. Julho. 2003. 61 slides. Apresentação em Power-point.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM **Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese**, A128, 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ó ASTM, **Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)**, G-75-15. West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ó ASTM, **Standard Test Method for conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Test**, G-105-16. West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ó ASTM, **Standard Test Method for Testing with Piin-on-Disc Apparatus**, G-99-05. Filadélfia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ó ASTM **Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus**. G-32, United States, 2003.

**ASM Handbook Metallography and Microstructures**, v. 15, p. 701-708, 2004.

EVERETT, Howard S. **Austenitic manganese steel**. ASM Handbook, v.1, p.1274 ó 1283, 2004.

AVIENT, W. E., GODDARD, J. WILMAN, H. **An experimental study of friction and wear during abrasion of metals**. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 258, p.159-180, 1960.

BATISTA, G. M. **Características do desgaste de anéis de pistão com diferentes tecnologias de tratamentos superficiais**. Dissertação de mestrado, instituto de pesquisa energética e nucleares, autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 19-35, 2003.

BAYER, R., G. **Mechanical wear Fundamentals and testing**. Marcel Dekker, 2<sup>a</sup> ed. N. York, 2004.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. Blucher, v. 2, p. 350-358, 2012.

CÂMARA, R.C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 8-9, 2006.

CAMILO, C. V. A. **Transição no regime de desgaste por deslizamento nos aços: Uma abordagem termodinâmica**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 28-30, 2010.

CORONADO, J. J. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais**. Tese de Doutorado Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 168, 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, v. 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, v. 271, p. 1794-1803, 2011b.

CZICHOS, H. **Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. Wear, v.1, p. 11-29, 1978.

DAS, S. ; MONDAL, D. P. ; SAWLA, S. ; RAMAKRISHNAN, N. **Synergic effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of an Al<sub>6</sub>Si alloy under varying loads and abrasive sizes**. Wear, v. 264, p. 47659, 2008.

DIESBURG, D. E.; BORIK, F. **Optimizing abrasion resistance and toughness in steels and irons for the mining industry**. Materials for the mining industry: Symposium : Vail, Colorado, p. 15 ó 34, 1974.

DUBBERSTEIN, K, T. **Efeito da carga e do tamanho do grão abrasivo no desgaste 19,9% Cromo do ferro fundido branco e 2,9% Carbono** . Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, p. 1-14, 2013.

EYRE T. S. **ó Wear Characteristic of Metals, Source Book on Wear Control Technology**, ASM, Metals Park, Ohio ó Usa, 1978.

GOMEZ, V. **Efeito da distribuição do tamanho das partículas abrasivas sobre as taxas e modos de desgaste para o ensaio de microabrasão**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, p. 23-25, 2014.

GONÇALVES, R. A. et al. **Determination of Mohs hardness of glazed tiles by scratching tests**, In: Qualicer 2000, **Proceedings**, Castellon, Spain, 2000.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold Publishers Ltd. Capítulos: V-IIIV, p. 77-203, 1992.

JACKSON, M. J.; PAULO, J. D. **Machining with Abrasives**. Aveiro, Portugal: Springer, 2011.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear Mechanisms. In: BHUSHAN, B. Handbook: **Modern tribology**. Principles of tribology. Vol.1, Flórida ó USA, 2001, cap. 7.

LARSEN-BADSE, J. **Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion**, Wear 12, 1968a, p.35653.

LIMA, A.; C. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana de açúcar**. 2008. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

LIMA, R, S. Apostila didática do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. **Tribologia**. Santa Catarina, p.9, 2012.

LI, N, X; SOSA, M; OLOFSSON, U. **A pin-on-disc study of the tribology characteristics of sintered versus standard steel gear materials**. Wear, Stockholm, Sweden, 2015.

LUDEMA, K. C. **Friction, Lubrication a textbook in tribology**. CRC Press, v. 1, 1996.

MAZAR, A. M.; JAFARI, S.; ABDOLLAH, H. **Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel-A Comparison**. Journal of iron and steel research, international, p. 43-50, 2012.

MONDAL, D. P. ; DAS, S. ; JHA, A. K. ; YEGNESWARAN, A. H. **Abrasive wear of Al alloyóAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive**. Wear, v. 223, p. 1316138, 1998.

MACHADO, P. Resistência a Abrasão de Aços Hadfield, In: **Anais da moqueca tribológica**, V.3, 2015. Disponível em <[http://tricormat.ufes.br/sites/tricormat.ufes.br/files/field/anexo/Paulo%20Machado%20\(UFPA\).pdf](http://tricormat.ufes.br/sites/tricormat.ufes.br/files/field/anexo/Paulo%20Machado%20(UFPA).pdf)> Acesso em 09-04-2016.

MEZLINI, S. ZIDI, M. ARFA, H. TKAYA, M. B. KAPSA, P. **Experimental, numerical and analytical studies of abrasive wear: correlation between wear mechanisms and friction coefficient**, C. R. Mecanique 333, p. 8306837, 2005.

NATHAN, G. W. JONES, J. D. **The empirical relationship between abrasive wear and applied conditions**, Wear. 9, 1966, p.3006309.

NEALE, M.J. - **Lubrication, a Tribology Handbook**, Butterworths, Oxford, 1993.

NEVES, G. S. **Efeito da substituição do molibdênio pelo nióbio e nióbio-boro em aços Hadfield no desempenho ao desgaste abrasivo**. 2004. Dissertação (Mestrado) ó Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

OTONI, C; E. **Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas.** 2005. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo.

PINTAÚDE, G. **Análises dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza .** Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

RABINOWICZ, E. **The wear of hard surfaces by soft abrasive,** in Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, ASME, 12-18, 1983.

RAMOS, D.,T., L; PALLONE, E., M., J., A ; PURQUERIO B., M.; FORTULAN, C., A. **Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo ôpin-on-discö.** Cerâmica, V.60, p. 443-448, 2014.

RICHARDSON, R.C.D. **The maximum hardness of strained surfaces and the abrasive wear of metals and alloys.** Wear, v.10, p. 353-82, 1967.

RICHARDSON, R.C.D. **The wear of metals by relatively soft abrasives.** Wear, v.11, p. 245-75, 1968.

ROCHA, G, L. **Influência dos elementos de liga no encruamento Proveniente do processo de aplainamento nos aços Hadfield.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista UNESP, São Paulo, p.13-17, 2011.

SILVA, J. F. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma.** Tese de doutorado. Universidade federal de Uberlândia, Minas Gerais, p. 11-19, 2008.

SINATORA, A. Erudição para o curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tribologia: **Um resgate histórico e o estado da arte.** São Paulo, p. 2 - 33, 2005.

SPINDOLA, M., O; GONZALEZ, B., M; SANTOS, D., B. **Modelo Físico da deformação e encruamento do aço TWIP com alto teor de manganês e baixo carbono.** Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 4, p. 252-256, abr.-jun. 2010.

STACHOWIAK, G, W. **Wear ó Materials, Mechanisms and Practice.** Editora: John Wiley & Sons Lt, England. 2005.

TABOR, D. **The hardness and strength of metals.** J.Inst. metals, v. 79, p 1-18, 1951.

TREZONA, R.I, ALLSOPP, D.N., HUTCHINGS, I.M. **Transitions between two-body e three-body abrasive wear: Influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** Wear (1999) p. 205-214.

TRESSIA, G. A. **Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores ó efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

VERDI, J. **Dispositivo pino-disco para análise de desgaste na presença de diesel e biodiesel.** Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 26-60, 2011.

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

VINÍCIUS, M., L., R.; VILLANI, M.; P. **Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares.** Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 4, p.329-335, Out/Dez 2009.

ZAMBRANO, O. A.; AGUILAR, Y.B.; VALDÉS, J., et al. **Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels.** Wear, v. 348-349, p. 61-68, 2016.

ZAVAGLIA, C. A.C.; M.C. REIS, M, C. **Projeto e construção de um equipamento para ensaios de desgaste de materiais para uso em próteses ortopédicas.** Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 15, n. 1-2, p. 31-38, jan/ago 1999.

ZHANG, S.W. **Tribology and Interface Engineering Series - " Tribology of Elastomers".** Elsevier B.V, p. 33-38, 2004.

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

ZUHM, GAHR, K. H. **Abrasive Wear of white cast iron.** Wear, 64, p. 175-194, 1980.

ZUHM, GAHR, K. H. **Wear by hard particles.** Tribology international, 31, p. 587-596, 1998.

WAINER, E. & BRANDI, D.S. & HOMEN, F.D. - **Soldagem Processos e Metalurgia.** Ed. Edgard Blucher - SP. Brasil, 1992.

WILLIAMS, J. A. **Engineering Tribology,** Oxford, p. 166-169, 1994.