

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO  
DE REVESTIMENTOS SOLDADOS DO TIPO Fe-C-Cr  
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**Autor: Rubens Ribeiro**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

**Orientador: Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella**

**Ilha Solteira, novembro de 2004**

# **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTOS SOLDADOS DO TIPO Fe-C-Cr UTILIZADOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**RUBENS RIBEIRO**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** na área de concentração de **Materiais e Processos de Fabricação** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Gilberto P. de Mello - Coordenador  
Unesp – Ilha Solteira

## **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella - Orientador  
Unesp – Ilha Solteira

---

Prof. Dr. Ricardo Cury Ibraim  
Escola Politécnica da USP

---

Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto  
Unesp – Ilha Solteira

*“Porque o Senhor dá a sabedoria,  
da sua boca vem a inteligência e  
o entendimento.”*

*Provérbios 2:6*

*A Deus*

*A minha vizinha Arlinda*

*A minha tia Edna, que tanto tem me apoiado  
em todos esses anos como uma verdadeira mãe*

*A minha irmã Edilce*

*Aos meus amigos*

# *Agradecimentos*

*Ao Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella, pela criteriosa orientação recebida, paciência, dedicação e confiança depositada nestes anos de convivência acadêmica.*

*Ao Prof. Dr. Juno Gallego pelos esclarecimentos quanto às técnicas de fotografar e revelar as microestruturas dos corpos de prova.*

*Aos docentes do curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unesp de Ilha Solteira, pelos conhecimentos transmitidos, sem os quais não seria possível a realização desse trabalho, em especial o Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto e o Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu.*

*Ao Técnico, Sr. Marino Teixeira Caetano e ao estagiário técnico do Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica, Rodrigo Santos Romeu, pelo incansável apoio na execução de corpos de prova, ensaios, fabricação e preparação dos equipamentos afins.*

*Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Soldagem pelo auxílio e inigualável ambiente de trabalho.*

*A todos os amigos, funcionários e demais professores da UNESP, que direta ou indiretamente colaboraram com a execução deste trabalho.*

*Ao Departamento de Engenharia Mecânica, da UNESP pelo inestimável auxílio na análise e resolução de problemas.*

*A Usina Pioneiros, pelo fornecimento de parte do material experimental, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.*

*A empresa Regigant, na pessoa do Sr. Maurício Ribeiro de Lima, gerente industrial, pelo fornecimento de parte do material do equipamento de desgaste abrasivo.*

Índice de Tabelas .....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Símbolos e Abreviações .....	xvi
Resumo .....	xvii
Abstract .....	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Objetivo .....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 – Tipos de Desgaste .....	5
2.1.1 – Definição e Classificações .....	5
2.1.2 - Mecanismos de Desgaste por Abrasão .....	10
2.1.3 - Ensaios de Desgaste Abrasivo .....	13
I) Ensaio de Abrasão por Goivagem .....	14
II) Ensaio de Abrasão e Impacto .....	15
III) Ensaio de Abrasão a Alta Tensão .....	16
IV) Ensaio de Abrasão a Baixa Tensão .....	17
IV-1) Ensaio de Abrasão em condições molhadas e secas .....	18
IV-2) Ensaio de Abrasão à Baixa Tensão com equipamento ASTM G 65-91, com roda de borracha e areia sêca .....	21
2.1.4 - Fatores que afetam o Desgaste .....	28
I) Dureza do abrasivo .....	28
II) Tamanho do abrasivo .....	30

III) Geometria das partículas abrasivas .....	30
IV) Fatores Externos .....	31
2.2 - Soldagem de Revestimento .....	31
2.2.1 - Tipos de Ligas de Revestimento .....	33
2.2.2 - Seleção de uma Liga de Revestimento .....	33
Ligas à base de ferro .....	34
Ligas não ferrosas .....	35
Ligas à base de carbonetos de vanádio e tungstênio .....	35
2.3 – Soldagem por Eletrodo Revestido.....	36
2.4 – Microestrutura e Resistência ao Desgaste .....	40
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS .....	43
3.1 – Materiais .....	43
3.1.1 – Metal de base .....	43
3.1.2 – Metal de adição .....	44
3.2 – Equipamentos .....	45
3.2.1 – Fonte de Energia .....	45
3.2.2 – Equipamento para Ensaio de Desgaste .....	45
3.2.3 – Sistema de Peneiramento de Areia .....	46
3.2.4 – Corte, Usinagem e Pesagem das Amostras .....	47
3.2.5 – Análise de Dureza Metalográfica .....	47
3.3 – Métodos .....	48
3.3.1 – Planejamento Experimental .....	48
3.3.2 – Realização dos Experimentos .....	49
3.3.2.1 – Soldagem dos Revestimentos .....	49
3.3.2.2 – Ensaio de Desgaste Abrasivo a Baixa Tensão .....	50
3.3.2.3 – Ensaio de Dureza .....	52
3.3.2.4 – Análise Metalográfica e da Diluição .....	53

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
4.1 – Resultados Obtidos .....	55
4.2 – Resistência ao Desgaste .....	55
4.2.1 – Depósitos com uma camada .....	56
4.2.2 – Depósitos com duas camadas .....	58
4.3 – Dureza .....	61
4.4 – Diluição .....	69
4.4.1 – Efeito da Corrente de Soldagem na Diluição .....	71
4.4.2 – Efeito da Diluição na Resistência ao Desgaste .....	72
4.5 – Geometria do Cordão de Solda, Trincas Superficiais e Taxa de Deposição .....	73
4.5.1 – Geometria do Cordão de Solda .....	73
4.5.2 – Trincas Superficiais .....	76
4.5.3 – Taxa de Deposição .....	79
4.6 – Análise Microestrutural .....	80
4.6.1 – Microestrutura para os corpos de prova com depósito em uma camada .....	81
4.6.2 – Microestrutura para os corpos de prova com depósito em duas camadas .....	89
4.6.3 – Microdureza .....	95
4.6.3.1 – Análise da Microdureza para amostras com uma camada de revestimento .....	96
4.6.3.2 – Análise da Microdureza para amostras com duas camadas de revestimento .....	97

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....	99
5.1 – Sugestões para futuros trabalhos .....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101

## ***Índice de Tabelas***

---

Tabela 2.1	Parâmetros de Ensaio por roda de borracha e areia seca	23
Tabela 2.2	Tamanhos dos abrasivos recomendados pela norma ASTM G65-94 .....	24
Tabela 2.3	Dureza do aço ferramenta após ensaio de desgaste abrasivo .....	27
Tabela 2.4	Dureza do abrasivo e de fases .....	29
Tabela 2.5	Materiais da alma do eletrodo .....	37
Tabela 2.6	Elementos adicionados ao revestimento .....	39
Tabela 3.1	Composição química do metal de base .....	43
Tabela 3.2	Propriedades mecânicas nominais do metal de base .....	43
Tabela 3.3	Composição química e dureza do metal de adição .....	44
Tabela 3.4	Parâmetros de Soldagem para uma e duas camadas .....	49
Tabela 4.1	Perda de Volume (mm <sup>3</sup> ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com uma camada .....	57
Tabela 4.2	Perda de Volume (mm <sup>3</sup> ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas .....	59
Tabela 4.3	Ensaio de dureza Vickers e Rockwell C para corpos de prova com 1 camada de revestimento .....	62
Tabela 4.4	Ensaio de dureza Vickers e Rockwell C para corpos de prova com 2 camadas de revestimento .....	63
Tabela 4.5	Perda de Volume (mm <sup>3</sup> ) em função da dureza (HV) e da corrente de soldagem (A) para uma camada .....	66
Tabela 4.6	Perda de Volume (mm <sup>3</sup> ) em função da dureza (HV) e da corrente de soldagem (A) para duas camadas .....	66
Tabela 4.7	Resultados obtidos de diluição para depósitos com uma camada .....	70
Tabela 4.8	Resultados obtidos de diluição para depósitos com duas camadas .....	71
Tabela 4.9	Geometria dos cordões de solda para uma camada .....	74

Tabela 4.10	Geometria dos cordões de solda para duas camadas .....	74
Tabela 4.11	Valores de taxa de deposição obtidos para revestimento de uma camada .....	79
Tabela 4.12	Valores de taxa de deposição obtidos para revestimento de duas camadas .....	80
Tabela 4.13	Valores de microdurezas Vickers das amostras revestidas com uma camada .....	95
Tabela 4.14	Valores de microdurezas Vickers das amostras revestidas com duas camadas .....	96

## ***Índice de Figuras***

---

Figura 2.1	Representação esquemática de abrasão por goivagem ..	7
Figura 2.2	Representação esquemática de abrasão a alta tensão ...	8
Figura 2.3	Representação esquemática de abrasão a baixa tensão .	9
Figura 2.4	Conjunto de facas e martelos desfibradores .....	10
Figura 2.5	Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento .....	11
Figura 2.6	Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microcorte .....	12
Figura 2.7	Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento ou lascamento .....	12
Figura 2.8	Representação esquemática do processo de desgaste abrasivo.....	13
Figura 2.9	Representação esquemática de um britador de mandíbulas para ensaio a abrasão por goivagem .....	14
Figura 2.10	Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão .....	16
Figura 2.11	Representação esquemática de uma máquina de ensaio de pino sobre disco .....	17
Figura 2.12	Equipamento de ensaio de desgaste por abrasão em ambiente sêco ou molhado .....	19
Figura 2.13	Esquema simplificado dos equipamentos para ensaio de desgaste abrasivo a baixa tensão .....	21
Figura 2.14	Perda de volume dos materiais ensaiados em função da carga aplicada com velocidade fixada em 4m/s .....	26
Figura 2.15	Perda de volume dos materiais ensaiados para diferentes velocidades com carga fixada em 100 N .....	27
Figura 2.16	Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal .....	28

Figura 2.17	Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste .....	30
Figura 2.18	Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas .....	32
Figura 2.19	Processo de revestimento por soldagem .....	40
Figura 3.1	Equipamento de roda de borracha e areia seca para os ensaios abrasivos.....	45
Figura 3.2	Detalhe da amostra, roda de borracha e fluxo de areia durante ensaio.....	46
Figura 3.3	Sistema de peneiras, empregado na conferência da granulação da areia.....	47
Figura 3.4	Esquema representativo da deposição dos cordões de revestimento.....	50
Figura 3.5	Inversor de frequência.....	51
Figura 3.6	Esquema representativo das medidas de dureza.....	53
Figura 4.1	Valores de perda de volume médio para uma e duas camadas em função da corrente de soldagem .....	56
Figura 4.2	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) .....	58
Figura 4.3	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas .....	60
Figura 4.4	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com uma e duas camadas .	61
Figura 4.5	Relação dureza do revestimento (HV) e a corrente de soldagem (A) para depósitos com uma camada .....	64
Figura 4.6	Relação dureza do revestimento (HV) e a corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas .....	64
Figura 4.7	Relação entre dureza do revestimento e a corrente de soldagem para depósitos com uma e duas camadas .....	65
Figura 4.8	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da dureza (HV) para depósitos com uma camada .....	67
Figura 4.9	Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da dureza (HV) para depósitos com duas camadas .....	68

Figura 4.10	Relação entre dureza do revestimento e a perda de volume (mm <sup>3</sup> ) para depósitos com uma e duas camadas	68
Figura 4.11	Relação entre corrente de soldagem e diluição .....	72
Figura 4.12	Relação entre perda de volume e diluição para uma e duas camadas de revestimento .....	72
Figura 4.13	Amostra 180A soldada com 100 Amperes com depósito de uma camada .....	75
Figura 4.14	Amostra 100D soldada com 100 Amperes com depósito de duas camadas .....	75
Figura 4.15	Amostra 180A revestida com uma camada com corrente de soldagem de 180 Amperes após desgaste .....	76
Figura 4.16	Amostra 180D revestida com duas camadas com corrente de soldagem de 180 Amperes após desgaste ...	76
Figura 4.17	Amostra 160D com trincas no revestimento envolvendo a primeira e a segunda camada .....	77
Figura 4.18	Diagrama de Equilíbrio de Fases do sistema Fe-C-Cr .....	81
Figura 4.19	Microestrutura do metal depositado da amostra 100A .....	83
Figura 4.20	Microestrutura do metal depositado da amostra 120A .....	84
Figura 4.21	Microestrutura do metal depositado da amostra 140A .....	85
Figura 4.22	Microestrutura do metal depositado da amostra 160A .....	86
Figura 4.23	Microestrutura do metal depositado da amostra 180A .....	87
Figura 4.24	Microestrutura representativa da amostra 100A com aumento de 600 X .....	88
Figura 4.25	Microestrutura do metal depositado da amostra 100D .....	90
Figura 4.26	Microestrutura do metal depositado da amostra 120D .....	81
Figura 4.27	Microestrutura do metal depositado da amostra 140D .....	92
Figura 4.28	Microestrutura do metal depositado da amostra 160D .....	93
Figura 4.29	Microestrutura do metal depositado da amostra 180D .....	94

## ***Símbolos e Abreviações***

---

### **Símbolo Descrição**

AWS American Welding Society

ASTM American Society for Testing Materials

AFS American Foundry Society

GMAW Gás Metal Arc Welding

SAER Soldagem a Arco Elétrico por Eletrodo Revestido

MIG Soldagem a Arco Elétrico com Proteção de Gás Inerte

MAG Soldagem a Arco Elétrico com Proteção de Gás Ativo

API American Petroleum Institute

ZAT Zona Afetada Termicamente

HV Dureza Vickers

HRC Dureza Rockwell C

Ha Dureza do Abrasivo

Hm Dureza do Metal

## **Resumo**

---

O presente trabalho utiliza o processo de soldagem por eletrodo revestido, para a aplicação de revestimentos metálicos que aumentam a resistência ao desgaste de peças submetidas a abrasão, utilizados na indústria sucroalcooleira. Como metal de revestimento foi utilizado eletrodo do tipo Fe-Cr-C, e como metal de base um aço estrutural ASTM A-36. Realizou-se um estudo sobre a influência dos parâmetros de soldagem, principalmente a corrente de soldagem, nas características da dureza, diluição, geometria do cordão e microestrutura, visando maximizar a resistência ao desgaste por abrasão à baixa tensão obtida pelo ensaio de roda de borracha definido pela norma ASTM G-65-91. Para a otimização das condições de soldagem foi utilizado um planejamento experimental, proporcionando uma ampla faixa de depósitos com características diferentes e conseqüente variação na resistência ao desgaste. Dos resultados obtidos ficou evidenciada a influência dos parâmetros de soldagem na resistência a abrasão à baixa tensão, assim como uma certa correlação entre dureza e resistência ao desgaste. A diluição mostrou-se influente na formação da microestrutura do revestimento, sendo que aqueles que apresentaram uma maior quantidade de carbonetos primários demonstraram melhor resistência ao desgaste do que os revestimentos com carbonetos secundários.

## ***Abstract***

---

The application of shielded metal arc welding process for hardfacing aiming the enhance of wear resistance, applied in sugar and alcohol industries, is presented in this work. The consumable was Fe-Cr-C, and the base plate is a structural steel ASTM A-36. The influence of the welding process variables such as: current, voltage and travel speed were evaluated and related to its influence on the characteristics of the hardness dilution, bead dimension and microstructure of hardfacing. The aim was to maximize the low stress abrasion resistance obtained by the standard test ASTM G-65-91. To optimize the welding conditions, an experimental design was applied to obtain a wide range of weld deposits with different characteristics and wear resistances. There was evidence of the influence of the welding process variables in the abrasion resistance and some relation between the hardness and wear resistance. The dilution influenced the microstructure of the hardfacing for all weld deposits; those with higher primary carbides contents had performance better than those with secondary carbides under low stress abrasion test conditions.

# Introdução

O desgaste de partes ou peças de equipamentos é um fenômeno que ocorre em todos os campos da indústria, e com o qual a mesma convive há muito tempo. A reposição de componentes sujeitos ao desgaste era um remédio aceitável, em um passado remoto (Rebello et al, 1987).

Ainda hoje, um dos problemas que mais aflige engenheiros e técnicos nas indústrias é o prolongamento da vida útil desses componentes de máquinas e equipamentos por apresentar um custo muito elevado para as empresas. As áreas de manutenção das indústrias tem lutado contra o desgaste, visando aumentar o tempo entre paradas de manutenção ou reduzir as trocas de componentes. A possibilidade de reconstruir esses componentes ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho em aplicações que exijam grandes solicitações ou fenômenos complexos de desgaste, é constantemente estudada e novas técnicas propostas, sempre no sentido de aumentar a vida útil e reduzir tempos e custos. Uma das técnicas mais empregadas é a aplicação de revestimentos anti-desgaste, podendo esta ser feita por soldagem ou metalização entre outros processos disponíveis, com excelentes resultados e permitindo, em muitos casos, alcançar tempos de vida superiores ao de peças novas (Monteiro & Cunha, 1993).

A soldagem de revestimento é um processo no qual uma liga é depositada na superfície de um metal de base, ou para colocá-la nas dimensões originais ou para obter alguma propriedade desejada tal como, resistência ao desgaste, impacto, corrosão, etc. A soldagem de revestimento é, portanto, um processo de fabricação alternativo onde se consegue conciliar propriedades diferentes, e muitas vezes opostas entre si, no núcleo e na superfície do material, tornando-se possível, por exemplo, obter um componente com características estruturais dúcteis no seu núcleo e alta resistência à abrasão na superfície (Costa & Payão, 1994).

No campo das soldas de manutenção, podemos classificá-las em soldas de manutenção corretiva, preventiva e preditiva. No caso de solda de manutenção corretiva, o serviço é realizado após a peça ter sido retirada de trabalho pelo excessivo desgaste que sofreu. Já na soldagem de manutenção preventiva, aplica-se um revestimento na peça nova, melhorando a região que sofrerá desgaste, cujas características quanto aos desgastes são superiores às do metal base. Finalmente, nas soldas de manutenção preditivas, não se espera que a peça saia do trabalho após o desgaste total, mas durante o trabalho, faz-se um revestimento por solda, evitando deste modo a parada do equipamento.

Nas Usinas Sucro Alcooleiras, a soldagem de revestimento anti-desgaste é aplicada em componentes como rolo de moenda, eixo de moenda, facas e martelos desfibradores, exaustores, roletes, bagaceiras, entre outros. Já nas indústrias mineradoras, o principal fator de desgaste é abrasão combinado com choque e/ou pressão. Neste segmento industrial os serviços de soldagem são executados em peças de grandes dimensões e envolvendo significativas quantidades de material de soldagem. As principais aplicações são nos seguintes equipamentos: moinho de minério de ferro, caçambas, escavadeiras, caminhões fora de estrada, carregadeiras sobre rodas e esteiras, britadores, entre outros (Monteiro & Cunha, 1993).

A soldagem de revestimento tem assumido uma importância cada vez maior, por realizar reconstituições de peças avariadas e deposições de camadas protetoras com baixo custo operacional, e por propiciar a redução do tempo de parada não programada. Logo apresenta-se como uma solução prática e viável, devido às grandes vantagens e flexibilidade desta técnica, (Brandim et al, 2003).

## 1 - OBJETIVO

O presente estudo, procurou verificar os vários tipos de desgastes abrasivos que ocorrem, dando uma ênfase maior ao desgaste abrasivo a baixa tensão, caso que mais frequentemente ocorre nas indústrias sucroalcooleiras, alvo da presente pesquisa. Além disso procurou-se também estudar as várias ligas de revestimentos usadas no processo de soldagem.

O principal objetivo desse trabalho é o estudo do processo de soldagem em soldas de revestimento duro do tipo Fe-C-Cr depositado pelo processo de soldagem por eletrodo revestido, no sentido de melhorar a resistência ao desgaste por abrasão à baixa tensão, onde foi avaliado a influência da corrente de soldagem nas características da morfologia do cordão de solda tais como: a geometria, a diluição, a microestrutura e a dureza desse cordão, visando maximizar a sua resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão.

# Revisão Bibliográfica

Na revisão bibliográfica foram tratados inicialmente os vários aspectos relacionados com os tipos de desgaste tais como: definição e classificações, mecanismos de desgaste por abrasão, ensaio de desgaste abrasivo, fatores que afetam o desgaste abrasivo e as ligas de revestimento usadas no processo de soldagem.

Posteriormente foi avaliado o processo de soldagem por eletrodo revestido (SAER), para revestimento metálico e sua influência na microestrutura e resistência ao desgaste em soldagem de revestimento.

## 2.1 – TIPOS DE DESGASTE

### 2.1.1 - Definição e Classificações

- O fenômeno do desgaste é de maneira geral, o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras que estão entre ou embutidas em uma ou ambas superfícies em movimento relativo, (Dias & Gomes, 2003).
- Nos metais, esse processo pode ocorrer pelo contato com outros metais, sólidos não metálicos, líquidos em movimento, ou ainda partículas sólidas ou partículas de líquido transportadas em um fluxo gasoso, (Ramalho, 1997).

Pode ser definido como: “dano a uma superfície sólida envolvendo uma perda progressiva de material devido à movimentação relativa entre a superfície e um ou vários tipos de materiais”.

Segundo Brandi, desta definição podemos tirar três idéias importantes:

- **Dano a uma superfície** – o desgaste é um fenômeno tipicamente superficial.
- **Movimentação relativa** – é importante para ajudar e identificar os tipos de desgaste e os fatores que podem acelerá-lo.
- **Tipo de material** – ajuda na identificação do tipo de desgaste e na maior ou menor severidade de um tipo de desgaste para materiais diferentes.

O desgaste pode ocorrer na forma de perda de material ou dano superficial. O grande número de termos usados para descrever os tipos de desgaste dificultam a discussão de seus problemas. Diversos autores propuseram diferentes tipos de desgaste em função dos mecanismos de desgaste encontrados, dentre eles, cita-se os desgastes por: abrasão, adesão, corrosão, fadiga superficial, impacto, erosão, cavitação e atrito. Já a norma DIN 50320, classifica os mecanismos de desgaste em quatro principais que são: adesão, reação triboquímica, fadiga superficial e abrasão.

**Desgaste por adesão ou fricção:** é um dos tipos de desgaste encontrados em situações de engenharia que mais prevalece, sendo o mecanismo identificado em mais de 15% dos desgastes industriais. Esse desgaste é geralmente identificado pelo cisalhamento superficial ou destacamento de material com o resultado do movimento relativo entre as duas superfícies, as quais se desgastam pela ação dos fragmentos soltos, (Ramalho, 1997).

**Desgaste por reação triboquímica:** é a remoção de material ou degradação de propriedades mecânicas de um metal, devida à ação química ou eletroquímica de meios agressivos, ou devido à remoção de material por meios mecânicos facilitada pela reação química. Pode ser dividida em: corrosão em meio aquoso, oxidação, corrosão em meios orgânicos e corrosão em metais líquidos.

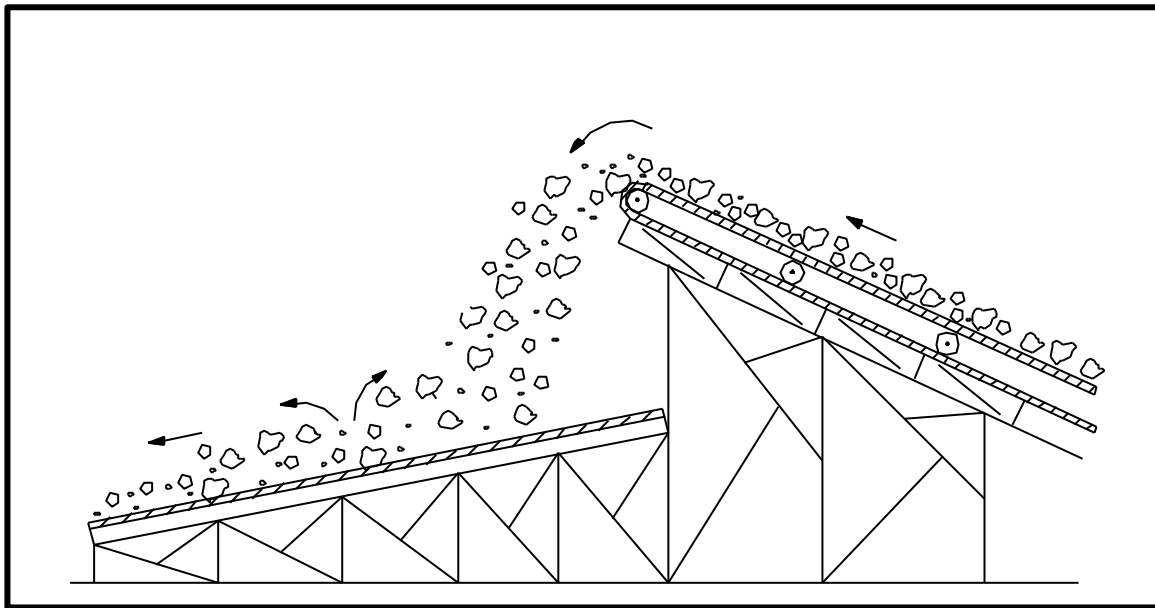
**Desgaste por fadiga superficial:** ocorre em componentes submetidos a carregamentos cíclicos, onde normalmente não há grandes perdas de material da superfície. Está proximamente relacionado ao fenômeno geral da fadiga e similarmente sujeito a um período de incubação antes do aparecimento dos danos. O desgaste ocorre principalmente pela remoção do material da superfície por ação mecânica. Entretanto, em muitos casos, a ação química sobre a superfície pode afetar o processo do desgaste mecânico. Quando em temperatura ambiente, denomina-se fadiga de contato e, acima de 100 graus Celsius, fadiga térmica .

**Desgaste por abrasão:** é o fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a remoção do material, (Ramalho, 1997).

De todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais comumente encontrado na indústria, (Kassim, 2000).

Em relação ao tipo de abrasão, há vários mecanismos de desgaste por abrasão descritos na literatura, entre eles, **abrasão por goivagem**, **abrasão a alta tensão (moagem)** e **abrasão a baixa tensão (riscamento)**, sendo este último, objeto desse estudo.

**Abrasão por Goivagem:** É o desgaste que ocorre quando partículas abrasivas grosseiras e de grandes dimensões, principalmente dotadas de regiões pontiagudas cortantes com dureza maior do que a parte metálica que está sendo desgastada são impactadas com pressões mais ou menos violentas e repetitivas contra o componente, causando o corte da superfície desgastada pelo abrasivo produzindo grandes sulcos e ranhuras visíveis a olho nu. Este tipo de abrasão é verificado em dentes de caçambas que trabalham em lugares onde há areia, rocha ou argila ou em esteiras transportadoras de minério bruto quando há transferência do material por queda. Ver figura 2.1.



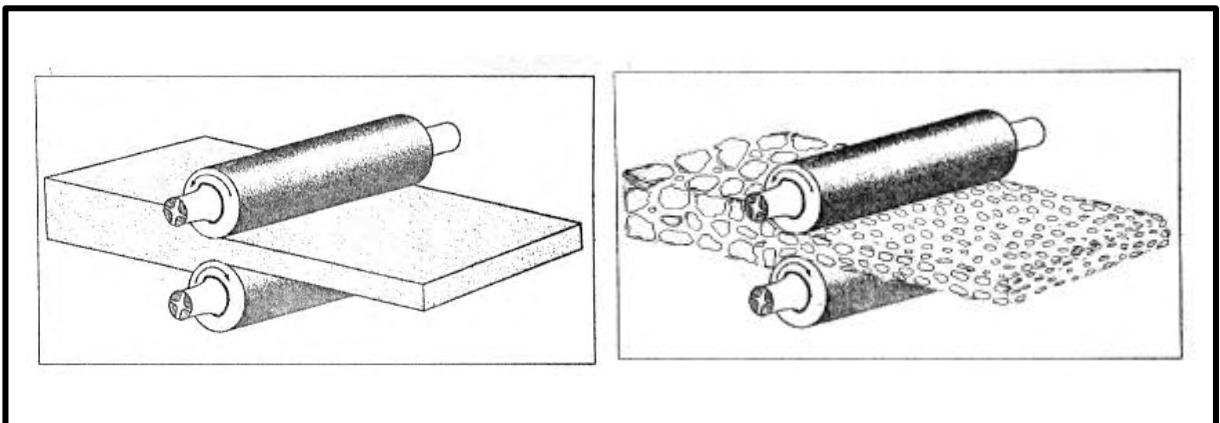
**Figura 2.1** - Representação esquemática de abrasão por goivagem.

**Abrasão à Alta Tensão:**- É o desgaste que ocorre entre partículas abrasivas e metal, ocasionando o esmagamento do abrasivo ou não.

A prensagem da partícula contra o metal, pode ser exercida por pressões fortes ou médias, provocando o surgimento de pequenos fragmentos. As partículas abrasivas podem ser de dimensões médias ou pequenas. A moagem provocada por partículas médias, exerce a sua ação abrasiva superficial, arrancando fragmentos do metal, enquanto partículas pequenas provocará o desgaste superficial pelo deslocamento de pequenos fragmentos do metal.

Este tipo de desgaste pode ser verificado nos seguintes equipamentos: Caçamba de escavação ou carga, lâminas niveladoras, arados, raspadores, cilindros de laminadores e rolos puxadores de linhas de laminação, etc..

No caso de abrasão a alta tensão, a literatura diz que o fator determinante para se obter resistência a esse tipo de abrasão, consiste em se obter uma microestrutura com presença de carbeto (partículas duras) em uma matriz dútil. Neste caso a partícula dura resistirá a ação de abrasão a alta pressão, protegendo a ação de desgaste da matriz dútil e mole. São ainda fatores determinantes o tipo, formato e distribuição dos carbeto no metal de solda, (Rebello et al., 1987). Ver figura 2.2.



**Figura 2.2** - Representação esquemática de abrasão à alta tensão.

**Abrasão a Baixa Tensão:** resulta do deslizamento de partículas livres sobre a superfície do componente. As tensões envolvidas são geralmente baixas, não excedendo a resistência de trituração do abrasivo. O material é removido da superfície a baixos ângulos de ataque por microssinagem. Desta forma, os abrasivos com arestas vivas produzem desgastes mais severos e a dureza da superfície minimiza a penetração e reduz a velocidade do desgaste. Tipicamente, a abrasão a baixa tensão ocorre na superfície dos componentes de equipamentos que, direta ou indiretamente, manuseiam terras, areias, minérios ou carvão, tais

como, máquinas agrícolas, equipamento de escavação, transporte, manuseio de minérios, além dos equipamentos das Usinas Sucroalcooleiras como, facas e martelos desfribadores, exaustores, roletes, bagaceiras entre outros.

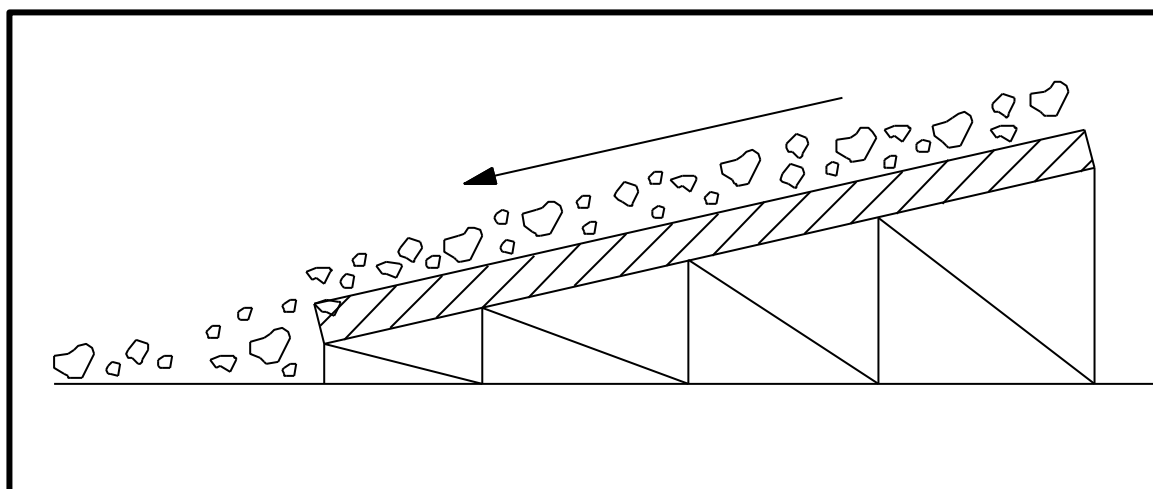
Quanto a abrasão a baixa tensão, alguns trabalhos dizem que geralmente há um acréscimo na resistência a abrasão com o aumento da dureza do revestimento. Já outros dizem que a resistência a abrasão a baixa tensão aumenta à medida que se obtém carbonetos mais grosseiros precipitados na matriz

As explanações acima mostram que o papel da microestrutura é muito importante no comportamento do material submetido a abrasão – seja por goivagem, a alta tensão ou a baixa tensão – e principalmente quanto aos produtos da decomposição da austenita enriquecida em carbono, ou seja, os carbonetos e partículas de segunda fase, e da forma como estes se apresentam na microestrutura.

Portanto, nota-se que à medida que se aumenta a quantidade das partículas duras, bem como o seu tamanho, há um melhor comportamento da resistência ao desgaste por abrasão a baixa tensão. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Silene, que sugere que o mecanismo responsável pela resistência a abrasão é devido a presença de grandes carbonetos na estrutura.

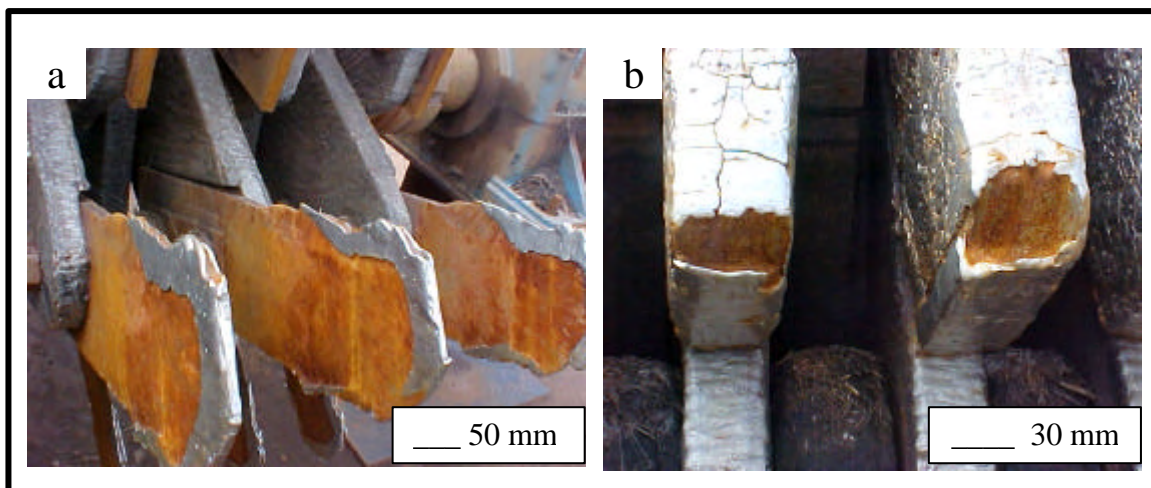
Em relação à dureza, deve –se evitar relacionar esta propriedade diretamente com a resistência a abrasão, pois sabe-se que os ensaios de dureza convencionais são ensaios quasi-estáticos, e não se relacionam muito bem à dureza sob condições onde a superfície metálica é atingida por partículas abrasivas em velocidades relativamente elevadas, (Rebello et al., 1987).

Ver figura 2.3.



**Figura 2.3** - Representação esquemática de abrasão à baixa tensão.

As figuras 2.4-a e 2.4-b, mostram fotos de peças (martelos e facas desfibradoras), da Indústria Sucrialcooleira, que foram submetidas a abrasão à baixa tensão.



**Fig. 2.4-a** – Conj. de facas desfibradoras. **Fig. 2.4-b** – Conj. de martelos desfibradores.

## 2.1.2 - Mecanismos de Desgaste por Abrasão

O mecanismo básico de desgaste por abrasão foi proposto por Khrushchov e Babichev citados por Wainner et al. Segundo os mesmos, existem dois processos agindo quando o abrasivo entra em contato com a superfície: o primeiro seria a formação de um sulco devido à deformação plástica, porém sem remoção de material, o segundo, a remoção do material da superfície na forma de pequenos cavacos. Estudos posteriores mostraram que aproximadamente 40% do material é removido por cavacos e o restante por deformação plástica (cisalhamento) (Hernandez, 1997)

Segundo Noble os principais mecanismos para o desgaste por abrasão são:

Para metais dúteis: -usinagem, onde as partículas abrasivas removem cavacos da superfície do material (um processo muito similar à conformação).

-**sulcagem** que promove deformação plástica localizada e encruamento, isto porque, o sulcamento contínuo introduz efeito de fadiga, facilitando o arrancamento do material.

Para metais mais duros (frágeis): -**lascamento** é o mecanismo dominante, ele ocorre quando trincas sub-superficiais laterais e verticais se interceptam. A descamação remove discretamente grandes lascas da superfície do metal (Noble, 1984).

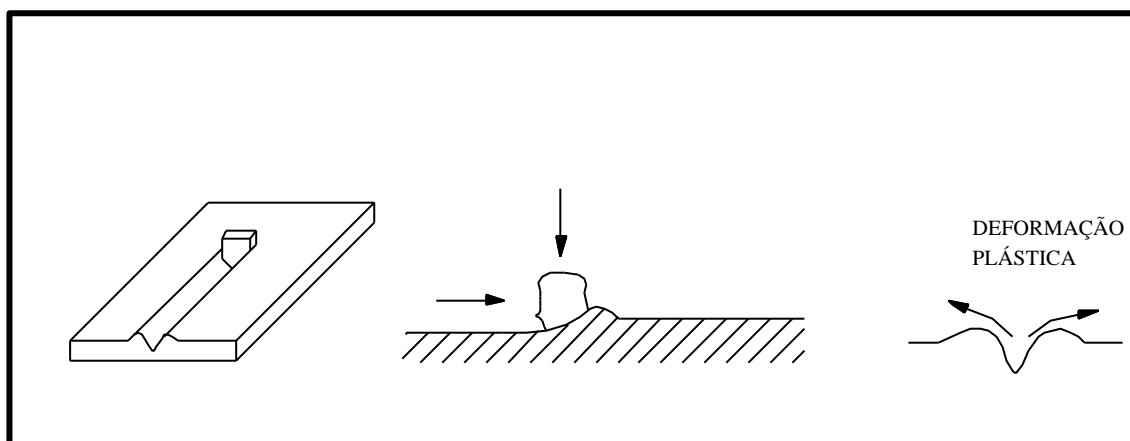
Segundo Gregolin (1990) existem diferentes micromecanismos de desgaste abrasivo que tem sido observados e identificados da seguinte maneira.

**\*mecanismos dúteis:-** sulcamento e microcorte.

**\*mecanismos frágeis:-** microtrincamento ou lascamento.

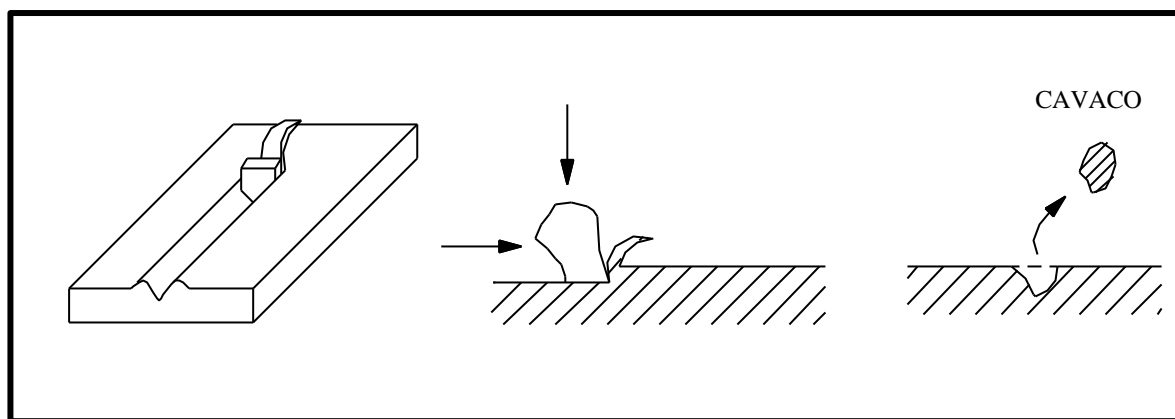
O **sulcamento** resulta da ação de partículas abrasivas deformando plasticamente a superfície de um material (ou fase) dúctil, formando um sulco em seu trajeto.

O material acumulado à frente da partícula escoava para as duas bordas laterais do sulco e não há propriamente perda de massa durante essa formação do sulco. Entretanto, a interação de diversas partículas abrasivas com a superfície provoca um resultado global de remoção de material. Ver figura 2.5.



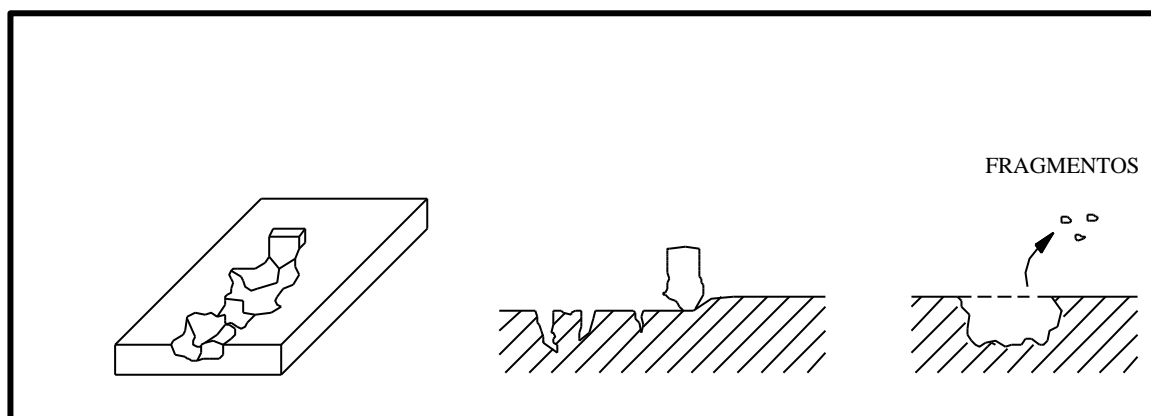
**Figura 2.5** - Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento – (Gregolin, 1990).

O **microcorte** consiste na formação de pequenos cavacos, quando as tensões de cisalhamento impostas pelo deslocamento da partícula abrasiva sobre a superfície são suficientemente elevadas para a ruptura do material dúctil. Ver figura 2.6 .



**Figura 2.6** - Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microcorte (Gregolin, 1990).

O **microtrincamento ou lascamento** é um processo de fragmentação da superfície frágil, pela formação e crescimento de trincas, devida à ação da partícula abrasiva. Ver figura 2.7.

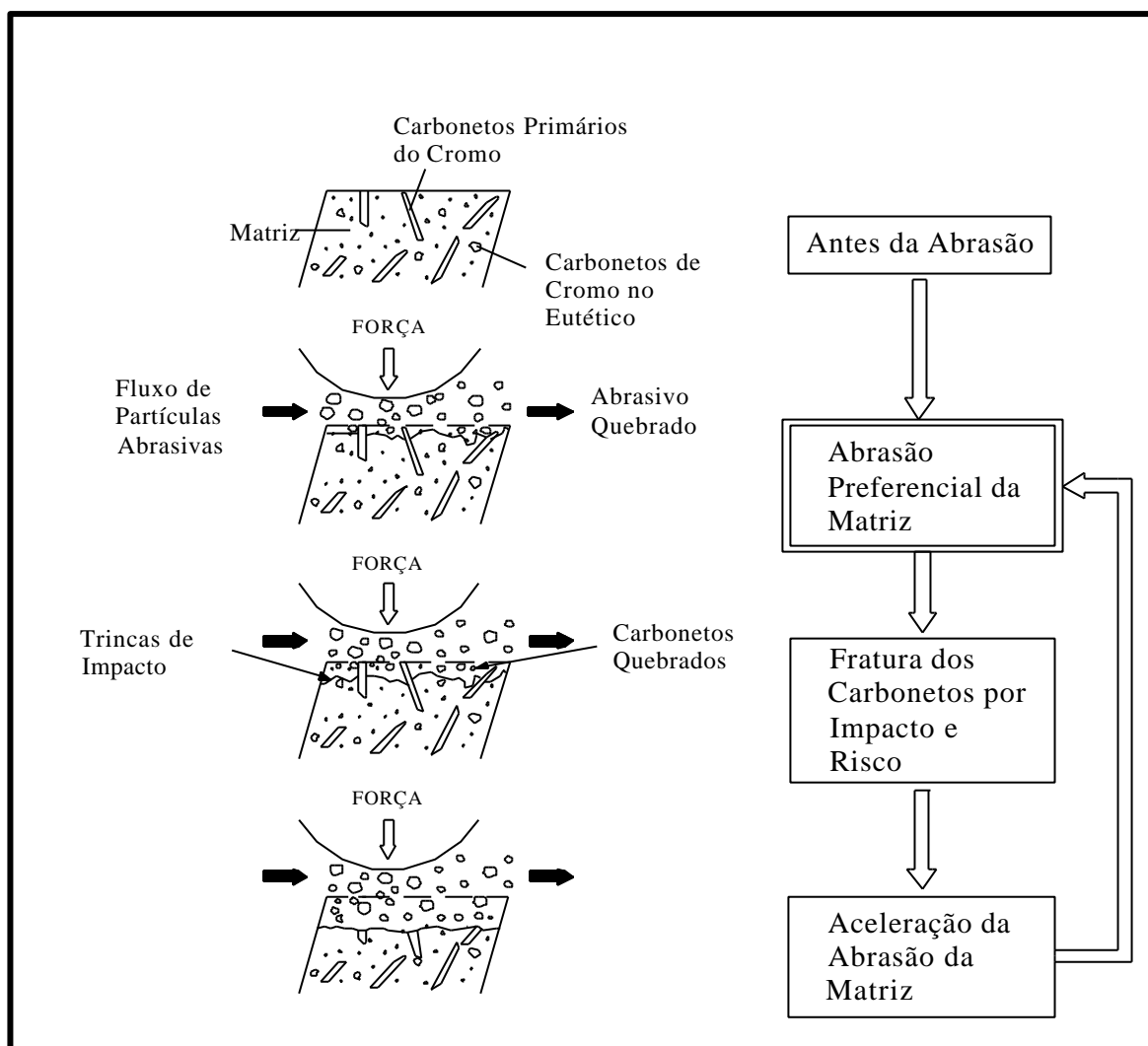


**Figura 2.7** - Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento ou lascamento (Gregolin, 1990).

O fenômeno interfacial envolvido é complexo e os vários mecanismos de desgaste podem ocorrer de forma combinada, somando-se a dependência de diferentes fatores que podem favorecer maior ou menor severidade no desgaste, (Gregolin, 1990).

Segundo Hernandez (1997) e Fujimura et al (1998) propõem o processo de desgaste abrasivo conforme se segue. As partículas abrasivas impactam a superfície do revestimento, atuando preferencialmente sobre a matriz metálica devido ao seu poder abrasivo, provocando

desgaste da mesma. A matriz desgastada deixa sem proteção os carbonetos primários de cromo, o qual reduz a resistência às tensões externas de impacto das partículas abrasivas resultando no trincamento dos carbonetos, fraturando-os e eliminando-os do revestimento. O processo é repetitivo, e provoca o desgaste acelerado do revestimento. Ver figura 2.8.



**Figura 2.8** - Representação esquemática do processo de desgaste abrasivo  
(Fujimura et al, 1988)

### 2.1.3 - Ensaios de Desgaste Abrasivo

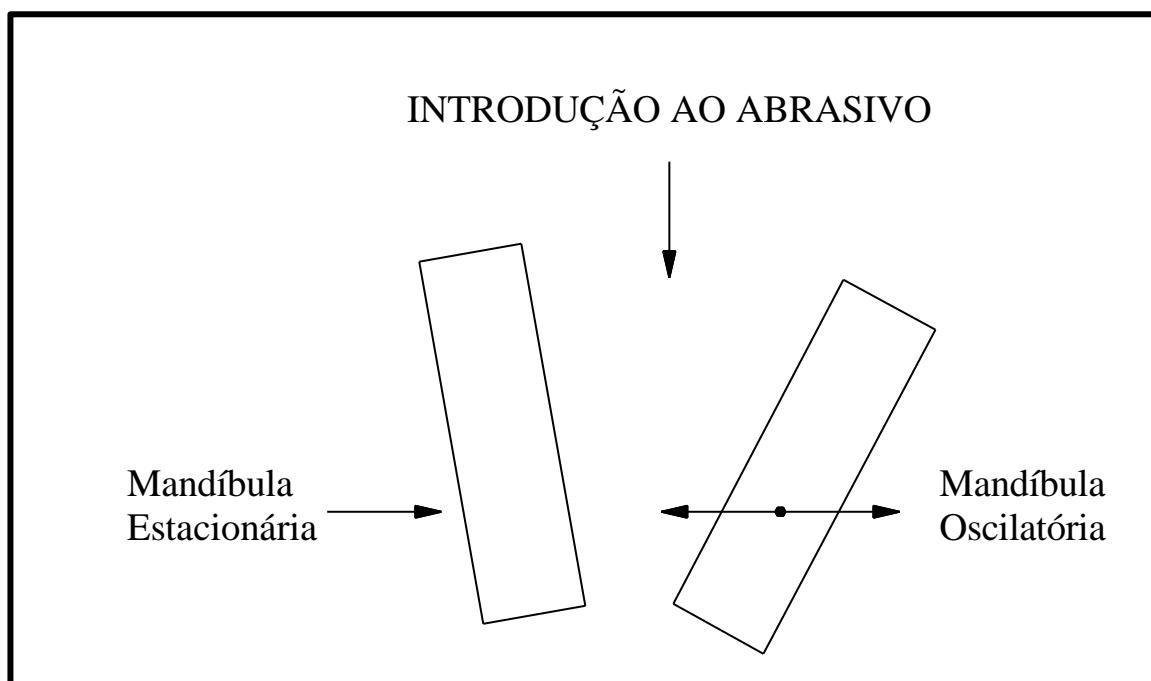
Existe uma grande dificuldade na comparação dos resultados experimentais obtidos em trabalhos de pesquisa de resistência ao desgaste, devido à variação dos métodos de ensaio e difícil controle de certos fatores do ensaio. Considerando-se especificamente o desgaste

abrasivo, a complexidade do fenômeno ainda não viabilizou a determinação de um único ensaio universal.

Muitos ensaios foram idealizados e desenvolvidos para a simulação das condições de desgaste semelhantes ou superiores àquelas atuantes nas três formas de abrasão (goivagem, alta tensão e baixa tensão). Muitos destes são normalizados e tem rígidos procedimentos para a sua execução, (Noble, 1984).

### ***1) Ensaio de Abrasão por Goivagem***

É a forma de desgaste mais difícil de se avaliar. O equipamento mais utilizado para simular este tipo de abrasão é o britador de mandíbulas. Esforços estão sendo feitos para normalizar este ensaio usando-se uma das mandíbulas como padrão e comparando-se com a perda de peso da outra mandíbula a ser ensaiada, (Noble, 1984). Ver figura 2.9 .



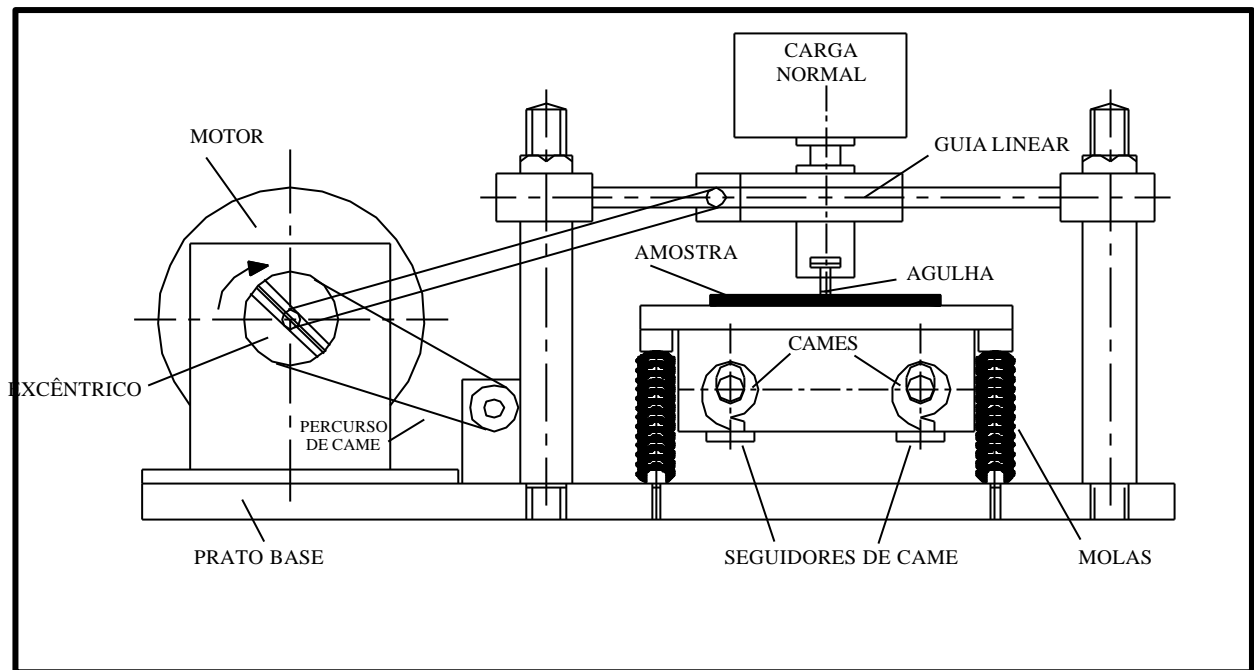
**Figura 2.9** - Representação esquemática de um britador de mandíbulas para ensaio de abrasão por goivagem (Noble, 1984).

## ***II) Ensaio de Abrasão e Impacto***

O desgaste por Goivagem se apresenta sob condições de abrasão e impacto, isso sugere a citação de um outro tipo de equipamento desenvolvido para realizar ensaios de impacto e abrasão. Esse equipamento utilizado para esse tipo de pesquisa é apresentado por Kennedy & Hashmi, 1996.

O corpo de prova é fixado junto à mesa de trabalho, que é posicionada a uma base, presa a quatro pilares através de guias deslizantes. Para ensaios de impacto a mesa move-se verticalmente nos portes de guia, através de cames. Forçando o corpo de prova contra o dispositivo abrasivo, que está preso acima do corpo de prova. Para ensaios de abrasão, ocorre movimentos no plano horizontal, onde o dispositivo abrasivo é movimentado horizontalmente sobre a amostra por meio de um ajustador excêntrico. Ambos, tanto a abrasão quanto as condições de impacto são dirigidas pelo mesmo motor.

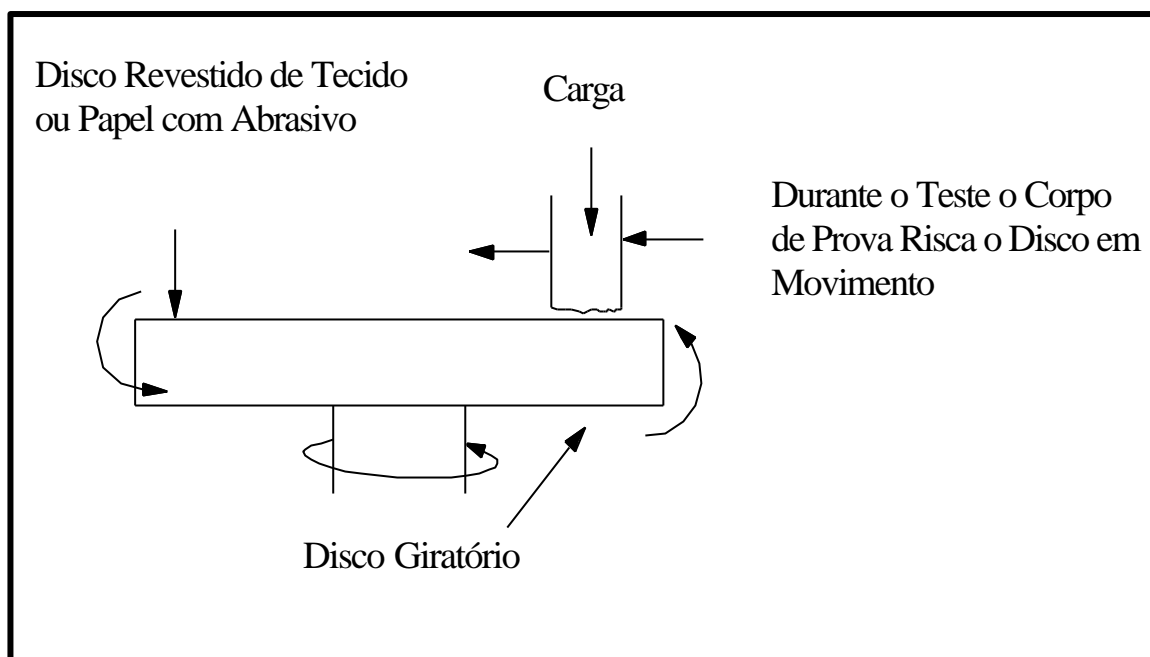
O desenvolvimento de um equipamento que combinava os efeitos de impacto e abrasão foi pesquisado para que pudesse ensaiar diversos tipos de materiais. O ensaio foi desenvolvido, ensaiando amostras de alumínio e aço moderado, comparando as amostras de ambos. O dispositivo abrasivo foi produzido de carboneto de tungstênio com raio de 2mm. O aparato foi projetado para permitir impacto a qualquer ponto ao longo da pista abrasada. Os resultados mostraram os efeitos de impacto e abrasão com diferentes velocidades além de comparar os efeitos de abrasão e impacto em separados durante o mesmo ensaio. A habilidade de combinar ensaios de desgaste ao mesmo tempo nas mesmas amostras e com o mesmo tipo de ensaio, representa uma melhoria nas normas de ensaios de desgaste, disponíveis atualmente, (Kennedy & Hashmi, 1996). Ver figura 2.10.



**Figura 2.10** - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão  
(Kennedy & Hashmi, 1996).

### ***III) Ensaio de Abrasão a Alta Tensão***

O equipamento mais utilizado é o de pino sobre disco, onde um pino produzido da liga a ser ensaiada risca uma roda abrasiva. A carga aplicada ao pino determina o grau de abrasão a altas tensões. Abrasivos livres podem ser adicionados ao sistema, ou podem ser gerados durante o ensaio, causando abrasão a três corpos. Novamente, um material de referência é utilizado para avaliar a taxa de abrasão a altas tensões, (Noble, 1984). Ver figura 2.11.



**Figura 2.11** - Representação esquemática de uma máquina de ensaio de pino sobre disco (Noble, 1984).

#### **IV) Ensaio de abrasão a Baixa Tensão**

Calcula-se que 50% de todos os problemas de desgaste ocorridos nas indústrias são devido à abrasão, e por isso muitos laboratórios procuraram pesquisar e estudar o fenômeno do desgaste abrasivo para uma grande gama de materiais.

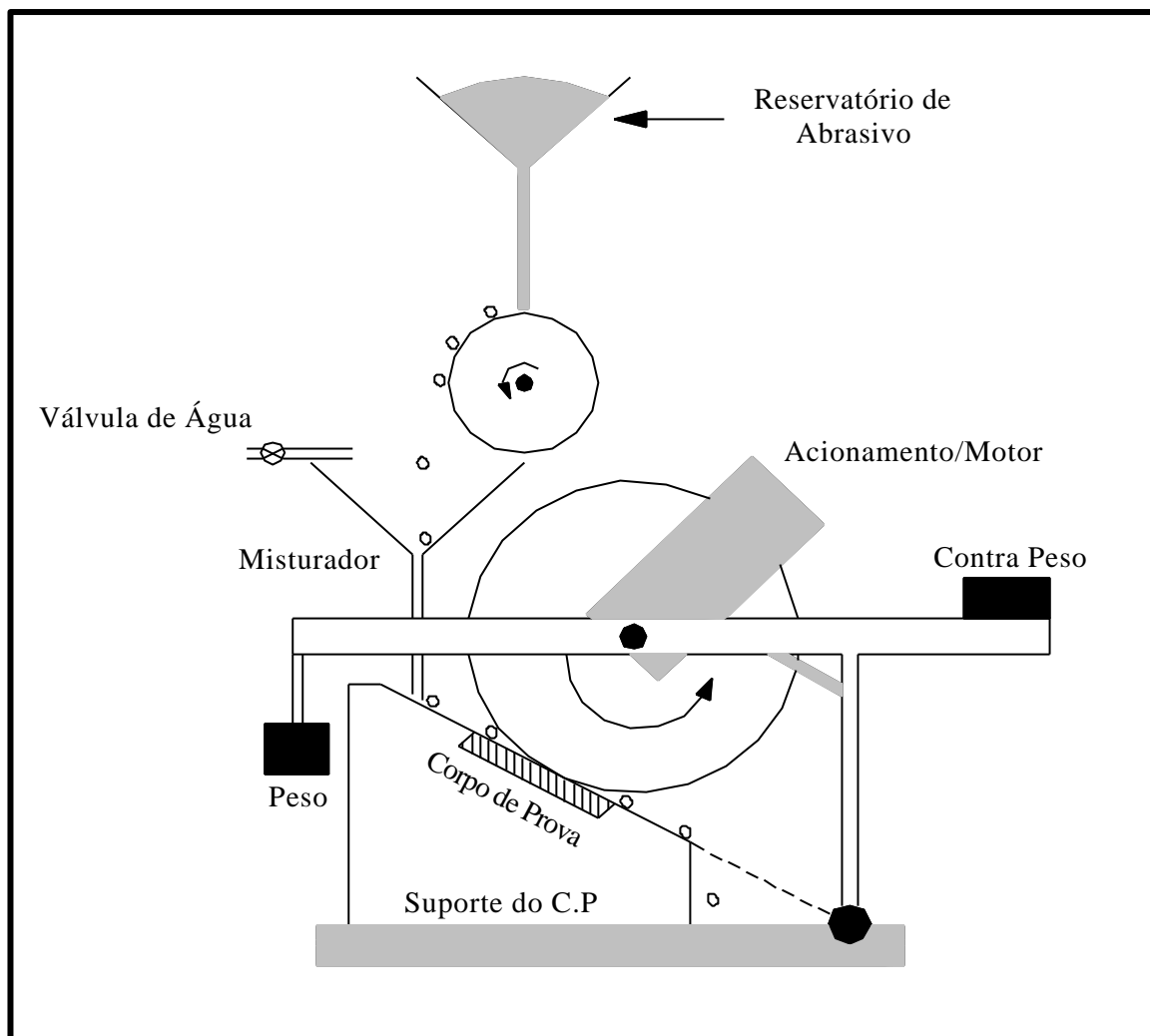
O desgaste por abrasão à baixa tensão é o tipo de desgaste que mais ocorre nos equipamentos e peças industriais (Kassim, 2000). As Usinas Sucroalcooleiras sofrem pesadas perdas devido a este tipo de desgaste (Monteiro & Cunha, 1993), fato este que motivou sua escolha para o desenvolvimento do presente trabalho.

Freqüentemente, mecanismos de ensaio de desgaste são projetados para simular uma aplicação específica, e por isso um número grande de métodos foram desenvolvidos. A configuração mais comum usada para abrasão a três corpos (corpo de prova, roda giratória e partículas abrasivas), tem seus princípios baseados na ASTM – norma G 65 (ensaio de abrasão por roda de borracha e areia seca), pela norma G 105 (ensaio de abrasão por roda de borracha e areia molhada) e pela norma B 611 (ensaio de abrasão por roda de aço e areia molhada, especificamente para carbonetos cementados). Todos os tipos de ensaios abrasivos

foram derivados da máquina de ensaio abrasivo de Brinell, que usou um disco giratório de ferro fundido e um fluxo de areia seca para desgastar os corpos de prova. Haworth comentou que a taxa de abrasão do aparato de Brinell, mudou com o tempo, devido ao tamanho crescente da área de contato entre a roda e o corpo de prova. Para melhorar esse problema Haworth, substituiu a roda de borracha para a roda de ferro. É do trabalho de Brinell e Haworth que todos os ensaios de abrasão fixados pela ASTM são derivados, (Wirojanupatump & Shipway, 2000).

#### ***IV-1) Ensaio de abrasão de aço moderado em condições molhadas e secas com equipamento de abrasão com roda de borracha e roda de aço.***

Este ensaio foi verificado com um aparato de roda giratória de borracha ou de aço, tendo como material abrasivo, grãos de alumina angulares, e grãos de sílica arredondados em ambientes secos ou em condições molhadas, conforme figura 2.12.



**Figura 2.12** – Equipamento de desgaste por abrasão em ambientes secos ou em condições molhadas - (Wirojanupatump & Shipway, 2000).

Com relação as comparações dos resultados obtidos por abrasão por roda de borracha e por roda de aço, poucos trabalhos foram desenvolvidos. Chen e Hutchings, observaram que um aço moderado, desgastou 2,5 vezes mais rapidamente em abrasão seca com sílica sub angular (areia) quando uma roda de aço foi empregada, que quando uma roda de borracha foi empregada, isto porque a roda de borracha, produz uma abrasão suave, onde as partículas abrasivas geralmente permanecem intactas durante todo o processo, enquanto que no aparato por roda de aço, as partículas são prensadas, resultando em abrasão severa (alta tensão), onde as partículas abrasivas tendem a fraturarem-se durante o processo.

Com relação aos resultados obtidos nos ensaios pela norma G 65 (roda de borracha e areia seca) e os resultados obtidos nos ensaios pela norma B 611 (roda de aço e areia

molhada), alguns pesquisadores, como Ness e Zibbell, compararam os resultados, porém ainda há várias contradições com relação aos resultados que devem ser examinadas, por haver um número grande de diferenças entre os dois tipos de ensaios, (Wirojanupatump & Shipway, 2000).

Wirojanupatump & Shipway observaram que, ao submeterem corpos de prova de aço acalmado a ensaios de desgaste abrasivo, a taxa de desgaste verificada foi uma função do tipo de abrasivo, tamanho e tipo do ensaio. Em condições secas a taxa de desgaste com partículas abrasivas angulares de alumina é semelhante tanto para a roda de borracha, quanto para a roda de aço. Porém, a taxa de desgaste com o abrasivo de sílica é muito maior com roda de aço do que com roda de borracha, nas mesmas condições, pois a sílica arredondada é esmagada, adquirindo a forma angular, resultando no aumento da abrasividade. Observou-se ainda, que a sílica de tamanho pequeno esmagou-se menos que a sílica de tamanho grande, resultando em menor taxa de desgaste. Os tamanhos maiores de sílica, esmagou-se facilmente na roda de aço, resultando em taxas de desgaste até maiores que as observadas com a alumina, devido a alta angularidade e baixa tendência ao engastamento durante o esmagamento.

Mecanismos e taxas de abrasão alteram-se significativamente em meio aquoso. Em todos os casos observados, partículas pequenas produziram baixas taxas de desgaste em água, devido à lubrificação eficiente entre a partícula e o corpo de prova e a redução das partículas fragmentadas.

Com o abrasivo de alumina angular, a taxa de abrasão aumentou significativamente com as partículas maiores, pois a lubrificação, nesse caso, se tornou ineficiente, tanto com roda de borracha, quanto com roda de aço, além disso, a água impediu que partículas de abrasivo da alumina ficassem engastadas no corpo de prova (como aconteceu no ensaio a seco com a roda de aço), resultando conseqüentemente no aumento da taxa de desgaste.

Com o abrasivo de sílica, a água se tornou um efetivo lubrificante para todos os tamanhos de partículas no ensaio por roda de borracha, desde que as partículas tivessem uma morfologia arredondada que era mais facilmente lubrificada. Com a roda de aço, a água resultou numa significativa redução da fragmentação da sílica e conseqüentemente numa significativa redução da taxa de desgaste em relação ao ambiente seco.

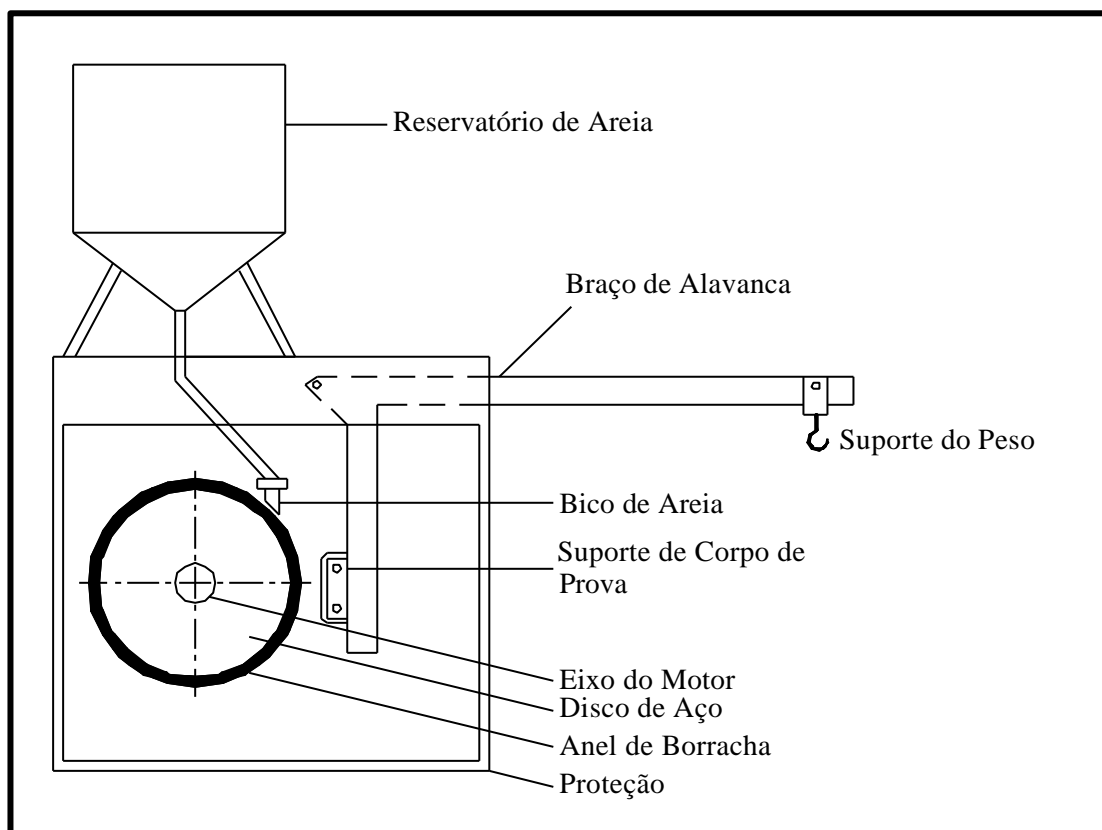
Em resumo, foi observado que:

- partículas angulares são mais abrasivas que partículas arredondadas.
- partículas de sílica esmagada são abrasivos mais agressivos.
- a roda de aço na condição seca produz partículas fragmentadas e, no caso da alumina, os fragmentos do abrasivo, ficam engastados na superfície do corpo de prova.

- partículas pequenas e/ou arredondadas podem ser bem lubrificadas com água, e isto resulta em baixa taxa de desgaste e baixo nível de fragmentação, tanto com roda de aço, como com roda de borracha.
- ambiente aquoso reduz a tendência do engastamento de partículas abrasivas no corpo de prova, e pode resultar em efetiva lubrificação promovendo o deslizamento de partículas (comportamento de dois corpos) em lugar de partículas rolando (comportamento de três corpos). Também reduziu o grau de fragmentação de partículas abrasivas em todos os casos, implicando que as tensões nas partículas também foram reduzidas, (Wirojanupatump & Shipway, 2000).

#### ***IV-2) Ensaio de Abrasão a Baixa Tensão com equipamento ASTM G 65-91, com roda de borracha e areia seca.***

A figura 2.13, apresenta o esquema simplificado de um equipamento de ensaio de abrasão a baixa tensão por roda de borracha e areia seca.



**Figura 2.13** – Esquema simplificado do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo a baixa tensão, recomendado pela ASTM G 65-91 – (ASTM, 1991)

O princípio de funcionamento deste equipamento, consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado com areia de tamanho de grão e composição controladas. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando riscamento. Neste ensaio o corpo de prova é pressionado contra a roda de borracha que está girando, por meio de um braço de alavanca com peso especificado, enquanto que o fluxo de areia esmerilhando a superfície do corpo de prova é controlado a uma vazão de 300 a 400 g/min. Os corpos de provas são pesados antes e após o ensaio e a perda de massa é determinada. Para possibilitar a comparação entre vários metais, torna-se necessário converter a perda de massa para perda de volume em milímetros cúbicos, devido à grande diferença nas densidades dos materiais.

A severidade do desgaste abrasivo em qualquer sistema irá depender do tamanho da partícula abrasiva, forma, dureza, a magnitude das tensões impostas pela partícula e a frequência de contato. Neste método de ensaio em roda de borracha, estas condições são padronizadas para desenvolver uma condição uniforme de desgaste referida como desgaste por riscamento. Desde que o método não tenta reproduzir todas as condições dos processos (tamanho do abrasivo, formato, pressão, impacto, ou elementos corrosivos), o mesmo não deverá ser usado para prever a exata resistência ao desgaste de um dado material num meio específico. Os dados da perda de volume obtida do material ensaiado, cujo comportamento é desconhecido num meio abrasivo específico, deve portanto ser comparado aos dados de ensaios obtidos de um material de comportamento conhecido no mesmo ambiente. Enquanto a perda de massa pode ser usada internamente em ensaios de laboratórios para comparar materiais de densidade equivalente, é essencial que aqueles que fazem uso deste ensaio registrem seus resultados uniformemente como perda de volume em publicações ou artigos, para que não haja confusão causadas pelas variações de densidades, (ASTM, 1991).

Com o uso da roda de borracha, o diâmetro da mesma diminui, e a quantidade de abrasão por riscamento desenvolvida numa dada prática irá, conseqüentemente, ser reduzida. A perda de volume atual produzida por esta roda será levemente menor, e o valor da perda de volume deve ser corrigido. Assim sendo, deve-se calcular a perda de volume corrigida pela seguinte equação, (ASTM, 1991):

$$PV_c = \frac{PV \times 228,6}{D_r}$$

Onde: **PV<sub>c</sub>** = Perda de Volume Corrigido

**PV** = Perda de Volume do Corpo de Prova

**D<sub>r</sub>** = Diâmetro da Roda após uso (mm)

### **IV-2.1) Procedimentos recomendados pela norma ASTM G65-94**

Existem 5 procedimentos recomendados para especificar o grau de resistência ao desgaste do material ensaiado, conforme mostra a tabela 2.1.

Tabela – 2.1 - Parâmetros de Ensaio por roda de borracha e areia seca (sílica A50-70)  
(ASTM, 1991).

<b>Procedimento</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>Revolução (ciclos)</b>	<b>Abrasão linear (m)</b>
<b>A</b>	<b>130</b>	<b>6000</b>	<b>4309</b>
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

**Procedimento “A”** – É um ensaio relativamente severo, que lista materiais de baixa a extrema resistência abrasiva. Este ensaio é particularmente útil para materiais que variam de média a extrema resistência abrasiva.

**Procedimento “B”** – É uma pequena variação do procedimento “A”. Deve ser usado, quando a perda de volume desenvolvida pelo procedimento A, exceder a  $100 \text{ mm}^3$ , é indicado para materiais de média e baixa resistência abrasiva.

**Procedimento “C”** – É uma pequena variação do procedimento “A”, e deve ser usado em camadas finas.

**Procedimento “D”** – É utilizado em materiais de baixa resistência abrasiva, pois a força atuante sobre o corpo de prova é bem menor (45 N).

**Procedimento “E”** – Uma pequena variação do procedimento “B”, recomendado para materiais com média ou baixa resistência abrasiva.

#### ***IV-2.2) Abrasivo recomendado pela norma ASTM G 65-94***

A tabela 2.2, mostra os tamanhos dos abrasivos de sílica (areia seca) recomendados.

**Tabela 2.2** – Tamanhos dos abrasivos recomendados pela norma ASTM G 65-94 (ASTM,1991).

<b>Tamanho da Peneira</b>	<b>Abertura</b>
40	425 $\mu\text{m}$
50	300 $\mu\text{m}$
70	212 $\mu\text{m}$
100	150 $\mu\text{m}$

#### ***Alguns Ensaio utilizando o equipamento estabelecido pela norma G 65 (roda de borracha e areia seca)***

##### **Ensaio – I**

Verificação da taxa de desgaste abrasivo do aço acalmado, abrasado por sílica seca de tamanho entre 125-150  $\mu\text{m}$  e vazão de 70 g/min, em função da carga aplicada, (Wirojanupatump, 2000).

##### **Condições:**

- Corpos de provas de aço acalmado nas dimensões de 70x20x7 mm,
- Carga: variando de 0 a 80 N.
- Distância de desgaste percorrida: 0 a 1200 m.
- Tipo de abrasivo: sílica 50/70 (recomendado pela ASTM).

Para as condições estabelecidas, verificou-se nesse ensaio, que a perda de massa sofrida pela amostra, foi uma função direta da distância percorrida pela roda de borracha, ou seja, a roda de borracha percorreu uma distância de 0 a 1100 m e a amostra sofreu um desgaste que variou entre 0 a 400 mg.

Verificou-se ainda com relação a taxa de desgaste sofrida pela amostra, que o resultado apresentado, também obedeceu uma razão direta entre a taxa de desgaste e a carga aplicada, ou seja, a carga variou entre 0 a 75 N, e a taxa de desgaste variou entre 0 a 0,37 mg/m.

Para este tipo de material e nas condições estabelecidas, a taxa de desgaste obedece a forma simplificada da equação de Archard, porém pode não se aplicar para outros materiais, como por exemplo o aço ferramenta, ou quando a carga aplicada for alta.

Equação de Archard:

$$Q = k.W$$

Onde: **Q** = taxa de desgaste

**k** = coeficiente de desgaste

**W** = carga aplicada

## Ensaio – II

Um estudo desenvolvido por Ma et al. (2000) apresenta os dados experimentais, e faz comparações das perdas de volume de três tipos de materiais desgastados, a saber: Liga Be-Cu (97,9% Cu – 1,9% Be – 0,2% Co), Aço Inox "17-4 PH stainless steel" (16% Cr – 4,1% Ni – 3,4% Cu – 0,25% Nb) e Aço Ferramenta "D2 tool steel" (12% Cr – 1% Mo – 1% V – 1,5%C), todos, sob as mesmas condições de desgaste.

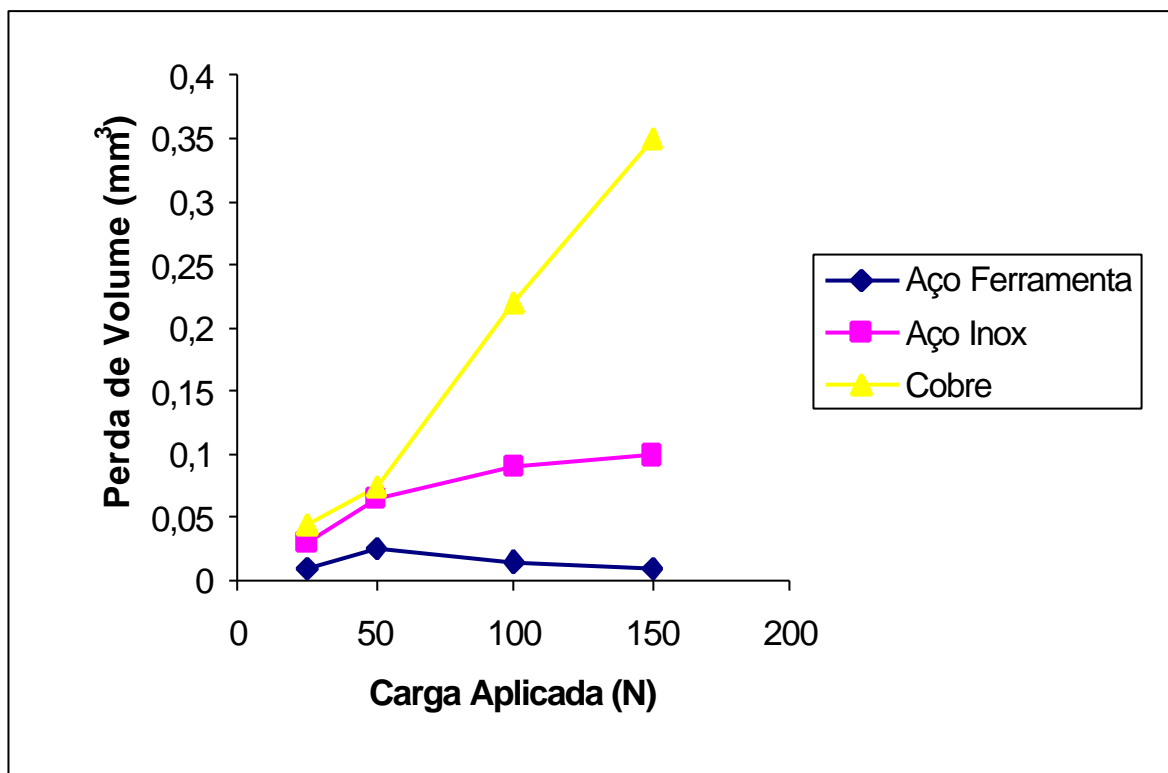
### Condições:

-Equipamento recomendado pela ASTM – G 65 para desgaste por abrasão por roda de borracha e areia seca.

-Corpos de provas nas dimensões de 70x20x7 mm, com os seguintes valores de dureza: Liga Be-Cu - (HRC 43.2), Aço Inox "17-4 PH stainless steel" - (HRC 46.5) e Aço Ferramenta "D2 tool steel" - (HRC 54.7).

- Carga: variando de 25 a 150 N.
- Velocidade de rotação do disco: variando de 1 a 5 m/s.
- Tipo de abrasivo: sílica 50/70 (recomendado pela ASTM)

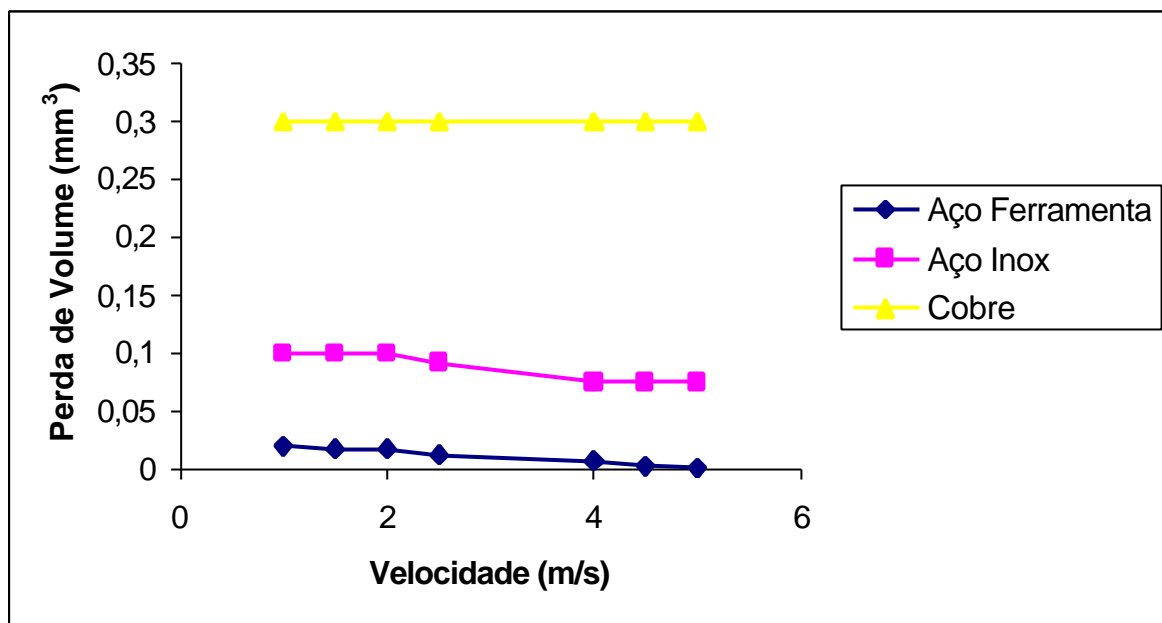
A figura 2.14, apresenta a perda de volume desses materiais em relação à carga aplicada, com velocidade da roda fixada em 4 m/s.



**Figura 2.14** - Perda de volume dos materiais ensaiados em função da carga aplicada com velocidade fixada em 4 m/s – (X. Ma et al. - 2000).

Esse resultado demonstrou que houve baixas perdas de material quando submetidos a baixas cargas, isto porque com baixas cargas, a tensão é bastante pequena. Observamos ainda que no caso do Be-Cu (Cu) e do 17-4 PH stainless steel (SS), à medida que foi aumentando a carga, foi aumentando também a perda de volume, enquanto que para o D2 tool steel, a partir de aproximadamente uma carga de 50 N, a perda de volume foi decrescendo, (Ma et al., 2000)

A velocidade de deslizamento é um outro parâmetro que pode influenciar na perda de volume do material. Foram analisadas a perda de volume desses materiais em cinco velocidades diferentes (o erro dos resultados girou em torno de 5%), conforme mostra a figura 2.15.



**Figura 2.15** - Perda de volume dos materiais ensaiados para diferentes velocidades para carga fixada em 100 N – (X. Ma et al. - 2000).

Nessa análise, foi demonstrado que a Liga Be-Cu e o Aço Inox "17-4 PH stainless steel", não sofreram variação de perda de volume à medida que se aumentava as velocidades, porém o Aço Ferramenta "D2 tool steel", apresentou uma variação de perda de volume para menos à medida que se ia aumentando a velocidade de deslizamento. Este estudo, mostra que ensaios realizados pelo mecanismo de roda de borracha e areia seca, para avaliar a resistência ao desgaste de materiais diferentes, podem apresentar informações incorretas ou imprecisas, se o ensaio for desenvolvido com parâmetros fixos de carga e velocidade (Ma et al., 2000). A tabela 2.3, apresenta a dureza do aço ferramenta "D2 steel tool", em diferentes condições de desgaste.

**Tabela 2.3** – Dureza do aço ferramenta “D2 steel tool” após ensaio de desgaste, sob diferentes condições - (Ma et al., 2000).

---

Carga = 25 N, V = 4m/s - 54,65 HRC (antes do ensaio) - 54,75 HRC (após o ensaio)

---

Carga = 150 N, V = 4m/s - 54,65 HRC (antes do ensaio) - 55,80 HRC (após o ensaio)

---

V = 1m/s, Carga = 100 N - 54,65 HRC (antes do ensaio) - 54,70 HRC (após o ensaio)

---

V = 5m/s, Carga = 100 N - 54,65 HRC (antes do ensaio) - 55,70 HRC (após o ensaio)

---

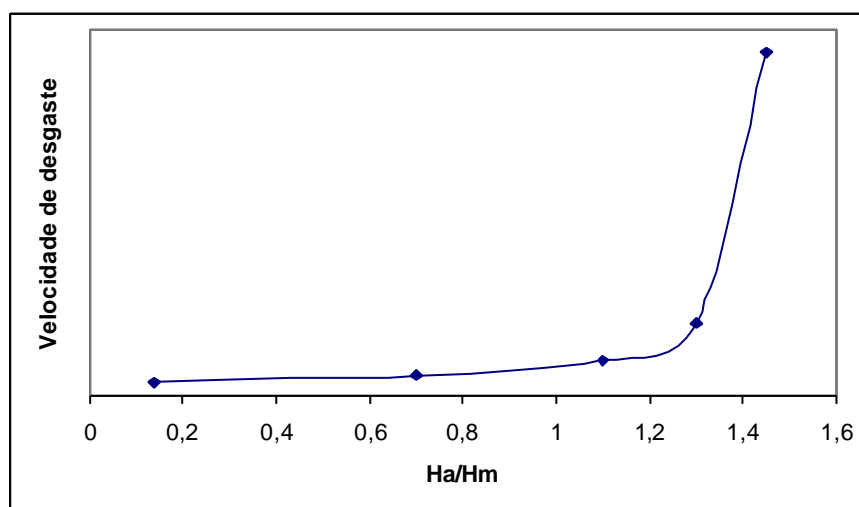
Foi verificado também neste estudo, que as partículas abrasivas de sílica, usadas no ensaio de abrasão do Aço Ferramenta "D2 steel tool", com cargas que variaram entre 25 a 150N, e velocidades que variaram de 1m/s a 5m/s, não apresentaram mudanças significativas na forma e tamanho, porém, com uma carga elevada de 150 N, o abrasivo sofreu uma forte deformação.

## 2.1.4 - Fatores que afetam o desgaste

Os principais fatores que afetam o desgaste abrasivo são as características do abrasivo (dureza, tamanho e geometria) e fatores externos que atuam sobre a superfície do componente durante o ensaio (velocidade de deslizamento e força de compressão entre abrasivo e superfície).

### ***l) Dureza do abrasivo***

O desgaste de um sistema depende do coeficiente de dureza, definido como a razão entre a dureza da superfície desgastada e a dureza da partícula. A figura 2.16 abaixo, mostra a relação entre dureza do abrasivo e a dureza do metal ( $H_a/H_m$ ), indicando três comportamentos distintos com relação à velocidade de desgaste. Para  $H_a/H_m$  entre 0.7 a 1.1, o desgaste é pequeno; para  $H_a/H_m$  entre 1.3 a 1.7 o desgaste é elevado, havendo indício de que independe da dureza do abrasivo. Na faixa intermediária há uma região de transição, com o desgaste aumentando com a relação  $H_a/H_m$ , (Wainner et al., 1992).



**Figura 2.16** – Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal - (Wainner et al., 1992).

Na literatura especializada há boa convergência na afirmação de que o desgaste por abrasão a baixas tensões é proporcional à dureza da superfície sujeita a solicitação, embora também dependa do tamanho e concentração de volume das fases duras como carbonetos, fosfetos e outras. A tabela 2.4 apresenta os valores de dureza do abrasivo e das diferentes fases em aços e ferros fundidos. No caso de abrasão a altas tensões, as fases frágeis são desejáveis, desde que ocorram em matrizes dúteis, mesmo que a dureza seja prejudicada, pois o componente deve suportar forças de compressão.

**Tabela 2.4** – Dureza do abrasivo e de fases (Eyre,1978)

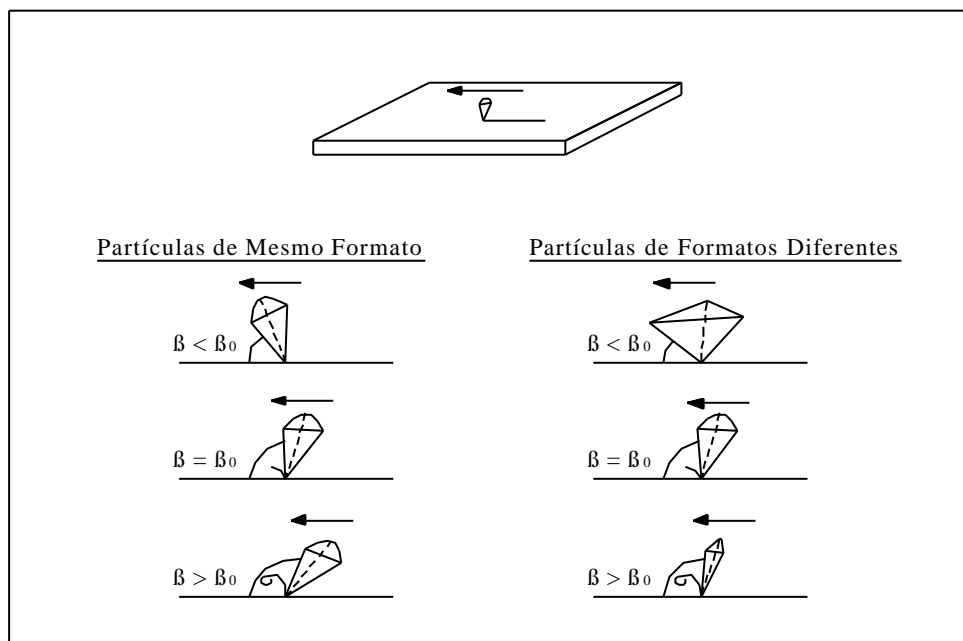
<b>Minerais</b>	<b>Dureza (Hv)</b>	<b>Fases</b>	<b>Dureza (Hv)</b>
Gesso	36	Ferrita	70-200
Calcita	140	Perlita, pura	250-320
Fluorita	190	Perlita, ligada	300-460
Aparita	540	Austenita, 12% Mn	170-230
Vidro	500	Austenita, baixa liga	250-350
Feldspato	600-750	Austenita, Fé alto Cr	300-600
Sílex	950	Martensita	500-1010
Quartzo	900-1280	Cementita	840-1100
Granada	1350	Carbonetos de Cr (Fe,Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1200-1600
Carvão	32	Carbonetos de Mo	1500
Cal	110	Carbonetos de W	2400
Coque	200	Carbonetos de V	2800
Minério de Ferro	470	Carbonetos de Ti	3200
Sinter	770	Carbonetos de Bo	3700
Corindu	1800	Carbonetos de Nb	2400
Diamante	10000	Carbonetos de Fe	1100

## II) Tamanho do abrasivo

Não existe boa relação entre o desgaste abrasivo e o tamanho da partícula abrasiva. O que se observa em geral é que o volume de material removido cresce com o tamanho da partícula. Hernandez, observa que Nathan e Jones, citados por Wainer et al., mostraram que para uma série de materiais metálicos o volume removido no desgaste aumenta linearmente com o tamanho da partícula abrasiva, sendo que esta variação é bastante acentuada até um tamanho crítico da partícula e a partir dele a variação é menos sensível (Wainer et al., 1992).

## III) Geometria das partículas abrasivas

Os minerais mais duros apresentam faces mais agudas (cortantes), ao passo que os minerais dúteis (moles), apresentam formas mais arredondadas. Sabe-se que as partículas que apresentam arestas cortantes causam desgastes mais acentuados que as partículas arredondadas. Quanto mais agudas forem as arestas das partículas abrasivas, maior será a sua ação abrasiva, e quando aliada ao impacto, ou fortes pressões, estas partículas podem penetrar na superfície mais profundamente e, dependendo do ângulo de ataque pode causar a formação de cavaco (Hernandez, 1997). Ver figura 2.17.



**Figura 2.17** - Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo (Hernandez, 1997).

## ***IV) Fatores Externos***

### ***IV.1) Velocidade de deslizamento***

De acordo com Hernandez, Nathan e Jones citados por Wainer et al verificaram que o volume de material removido por abrasão aumenta ligeiramente com a velocidade de deslizamento até 2.5 m/s. Este fato foi atribuído ao aquecimento da superfície provocada pelo atrito das partículas abrasivas, o que provoca uma diminuição das propriedades mecânicas do material.

### ***IV.2) Força de compressão entre abrasivo e superfície***

A perda de material por abrasão é diretamente proporcional ao esforço de compressão entre o abrasivo e a superfície metálica. Isso é válido até um certo valor crítico de força, que é determinada pela deformação excessiva da superfície metálica, ou então pela instabilidade das partículas abrasivas que passam a fraturar.

## **2.2 – SOLDAGEM DE REVESTIMENTO**

A soldagem de revestimento ou de recobrimento consiste na deposição de um consumível de soldagem com características em geral mais nobres ao metal de base, visando aplicações específicas com maiores durezas, resistência ao desgaste e/ou à corrosão, as quais o metal base não teria uma performance tão boa quanto ao material do recobrimento, porém, revestimentos com maiores níveis de dureza implicam em menores níveis de ductilidade, podendo ocorrer trincas, (Trevisan & Brantis, 1993).

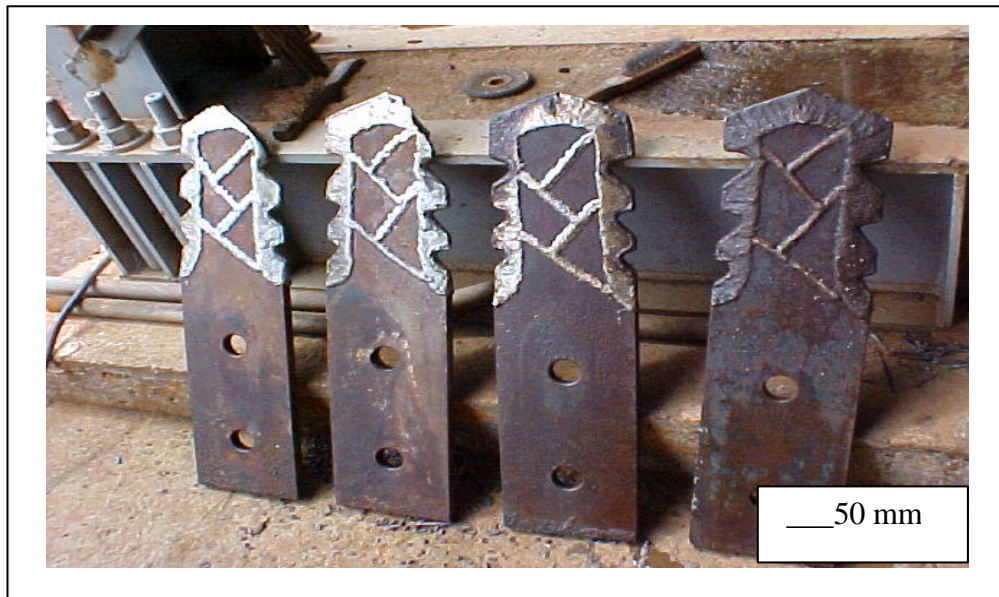
A taxa de deposição e diluição são os fatores que mais afetam as propriedades do revestimento. Estes fatores são dependentes das variáveis do processo que controlam o potencial de soldagem, isto é, tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem, etc. Para alta produtividade, é importante que se tenha uma alta taxa de depósito com baixa diluição e penetração uniforme.

A deposição do consumível pode ser executada em passes simples ou múltiplos, aplicando-se a tarugos, barras, tubulações, chapas e perfis, dentre outras formas de metal base.

Neste sentido, alguns parâmetros devem ser especialmente controlados, além daqueles normalmente monitorados como tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem, etc... O problema crítico é conciliar as altas tensões do material para amplas faixas de temperaturas que resistam às acomodações de contração.

A aplicação da soldagem de revestimento necessita estar bem definida, pois a altura do cordão de solda não pode ser excessiva que implique na perda acentuada de material do revestimento num processo de fabricação subsequente ao da soldagem como por exemplo, usinagem. Há que se conciliar uma penetração do cordão, de tal forma que não produza uma zona afetada pelo calor muito larga e com regiões de alta dureza, bem como baixa diluição para não mudar as características do revestimento.

A figura 2.18, mostra foto de facas desfibradoras utilizadas na indústria Sucroalcooleira, desgastadas e revestidas com ligas de revestimento duro pelo processo de soldagem a arco elétrico.



**Figura 2.18** - Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas.

Alguns exemplos de famílias de componentes em que a soldagem de revestimento é utilizada na fabricação ou recuperação destes podem ser citadas como: fabricação de tubulações e seus acessórios, recuperação de carcaças, eixos, rotores e componentes de bombas hidráulicas e compressores, reparos e fabricação de rolos cilíndricos de laminação em

processos de lingotamento contínuo nas indústrias siderúrgicas, recuperação de lâminas e dentes de máquinas do tipo escavadeiras e terraplanagem, etc.

## 2.2.1 - Tipos de Ligas de Revestimento

São vários os tipos de metais de adição empregados em revestimentos duros para soldagem, porém, há pouco consenso sobre norma ou classificação envolvendo a maioria das ligas empregadas.

As normas AWS A5.13-80 e AWS A5.21-80, classificam os metais de adição baseando-se na composição química do metal depositado, não levando em conta sua diluição. Spencer também desenvolveu uma classificação baseada na composição química onde os tipos de ligas ferrosas são divididas em cinco classes, (Monteiro & Cunha, 1993).

**\*Ligas a base de CrNi** – indicadas para aplicações de reconstrução, uniões dissimilares e “cladding”.

**\*Ligas a base de Fe com NiMo** – indicadas para uniões de aços de baixa e média liga.

**\*Ligas do tipo aço ferramenta** – são empregadas como proteção anti-desgaste de aços ferramentas que trabalham à frio e quente. As durezas dos depósitos variam entre 40 a 60 Rc, podendo estes serem tratados termicamente.

**\*Ligas do tipo FeCrC** – empregadas em serviços onde se necessita resistência a alta abrasão, choque e pressão. Os depósitos atingem durezas de até 63 Rc em um único passe de solda.

**\*Ligas do tipo CCrCo** – são indicadas para proteção anti-desgaste contra corrosão, oxidação a quente, altas temperaturas e ciclagem térmica. Suas durezas encontram-se entre 35 a 48 Rc.

## 2.2.2 - Seleção de uma Liga de Revestimento

A seleção de uma liga de revestimento depende em alto grau da natureza do processo de desgaste encontrado. Este pode encontrar-se numa ampla faixa, que vai desde uma simples

condição de desgaste a baixa tensão até uma situação muito complexa que envolve abrasão combinada com corrosão e alta temperatura. Portanto, há dificuldade para simular a situação real no laboratório. O aspecto inicial a ter em conta é o tipo de desgaste, método de aplicação e custo.

As ligas de revestimento podem ser classificadas, dividindo-se em 4 grupos:

**1º grupo – Ligas à base de ferro** que contém menos de 20% de adição de elementos de ligas.

**2º grupo – Ligas à base de ferro** que contém mais de 20% de adição de elementos de ligas.

As ligas a base de ferro constituem-se no grupo mais popular, principalmente pelo custo relativamente baixo e facilidade de aplicação, por exemplo:

\*Os aços ao carbono contendo 0,5%C, podem ser revestidos por soldagem ao arco elétrico, obtendo um revestimento com dureza de cerca de 240 HV. Sua resistência à abrasão é considerada baixa e sua principal aplicação se dá em reconstrução de peças fundidas de composição similar.

\*Ligas de aço Martensítico, amplamente utilizadas em revestimentos, devido ao baixo custo e diversidade de propriedades tais como: resistência ao calor e à corrosão. Suas aplicações típicas são em equipamentos de agricultura e terraplanagem, máquinas de escavações, pontes de ferrovia, munhões de cilindros, rodas de pontes rolantes, etc.

\*Os Aços Rápidos, são por definição aços ferramentas que podem ser usados para usinar metais em altas velocidades e elevadas temperaturas (500-600°C) sem sofrer amolecimento. Essas ligas são usadas em ferramentas de corte, matrizes para trabalho a quente e outros componentes que requerem resistência ao desgaste em temperaturas elevadas.

\*Os aços austeníticos ao manganês, apresenta uma estrutura austenítica que é mole (200 HV), mas, a qual endurece em serviço (para cerca de 600 HV), sob condições de impacto. São utilizados em revestimentos de britadores, pontes e cruzamentos de ferrovias, equipamentos de escavação de solos rochosos e em condições de serviço onde ocorrem impacto.

\*Os aços austeníticos ao cromo e manganês, são usados em aplicações similares aos dos aços austeníticos ao manganês, mas com a vantagem de ter uma maior resistência à abrasão, devido ao maior teor de cromo, o que provoca maiores quantidades de carbonetos.

\*As ligas de ferro fundidas austeníticas e martensíticas de alto cromo, contém cerca de 30% de Cr e a microestrutura consiste de carbonetos de cromo. Estas ligas estão disponíveis na forma de varetas fundidas ou em tubos de aço extrudados contendo partículas de

carbonetos no interior do arame. Essas ligas são aplicadas em equipamentos agrícolas e de mineração.

**3º grupo - Ligas não ferrosas:** são subdivididas em: **a)** ligas à base de níquel.

**b)** ligas à base de cobalto

**a) Ligas a base de níquel** – são usadas quando a abrasão está combinada em condições de corrosão, podem ser usadas ainda em aplicações de alta temperatura e desgaste.

**b) Ligas à base de cobalto** – são muito usadas onde existe combinação de desgaste abrasivo, corrosão e altas temperaturas, sendo com isso amplamente aplicadas onde ocorre contato metal-metal, e em válvulas sujeitas a impactos em elevadas temperaturas, como válvulas de combustão interna para motores de veículos e aeronaves e matrizes e guilhotinas para trabalhos a quente.

**4º Grupo - Ligas à base de carbonetos de vanádio e tungstênio** – são usadas em condições extremamente abrasivas ou onde é necessário corte de materiais.

Normalmente, antes de proceder a escolha de um metal de adição para uma determinada aplicação, deve-se adotar procedimentos a serem seguidos para evitar seleções de metais de adição que não atendam ao tipo de aplicação necessário. Vários autores descrevem procedimentos que irão auxiliar na escolha correta do metal de adição a ser aplicado em determinado serviço, entre eles podemos destacar, (Monteiro. & Cunha, 1993):

\*Identificar o material base antes de proceder o reparo ou recuperação, quando possível.

\*Identificar o sistema tribológico que age sobre a peça e verificar se existem ou não fatores que acelerem o desgaste.

\*Observar as condições superficiais e verificar a existência de trincas, áreas desgastadas e revestimento anterior. Verificar se a peça necessita reconstituição anterior ao revestimento duro.

\*Escolher a liga mais adequada, não esquecendo a compatibilidade metalúrgica entre o metal base e o metal de adição. Em certos casos é interessante utilizar outra liga para preparar a superfície da peça que irá receber o revestimento.

\*Selecionar o processo de soldagem mais adequado para a aplicação do revestimento.

\*Estabelecer um procedimento de soldagem que garanta as características desejadas do metal de adição escolhido.

\*Realizar ensaios experimentais, principalmente em aplicações críticas.

\*No caso de existirem várias opções de metais de adição ou processos para determinada aplicação, o critério de seleção passa a ser regido pelo fator econômico. Deve-se pesar bem, materiais ou processos mais caros, porém, que aumentem a vida útil do componente versus materiais ou processos mais baratos, porém, que apresentem vida útil menor do componente.

Os tipos de revestimentos mais aplicados em soldagem podem ser classificados em.:

- endurecimento superficial;
- resistentes à corrosão;
- resistentes ao desgaste e/ou impacto;
- para recuperação ou reparos de manutenção.

## **2.3 – SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO**

No processo de soldagem com eletrodo revestido(SAER), um arame coberto é fundido sobre a peça de trabalho pelo calor de um arco elétrico que é estabelecido entre o eletrodo e a peça e, geralmente a polaridade do eletrodo é reversa (ânodo positivo). Os parâmetros que devem ser considerados nesse processo de soldagem são: tipo e diâmetro do eletrodo, polaridade, a intensidade da corrente elétrica, o comprimento do arco, a velocidade de soldagem e o manuseio do eletrodo.

O processo é realizado manualmente e a fonte de soldagem é comumente de "corrente constante" para prevenir mudanças da tensão durante a soldagem manual. O calor gerado pelo arco funde ambos, o metal de base e o eletrodo e causa a transferência do metal líquido, na forma de gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Vários fenômenos físico-químicos, metalúrgicos e elétricos ocorrem na zona do arco, os quais são decisivos na morfologia, nas

propriedades mecânicas e na microestrutura da solda. Interações metal/escória na poça da solda e aquecimento do eletrodo devido ao efeito Joule, e também devido ao calor conduzido do arco, são alguns destes fenômenos.

A fabricação de eletrodos revestidos para a indústria moderna, se torna cada vez mais complicada, à medida que a faixa de aplicações se amplia e cada aplicação requer consideração especial. O revestimento do eletrodo é geralmente compactado em torno de um arame por meio de prensas extrusoras com grande capacidade de pressão. O material do arame do núcleo do eletrodo para eletrodos de baixa liga, como no caso do aço API, é na maioria dos casos, o aço de baixo carbono. Para aços de alta liga, um arame com composição química similar à do metal de base é mais usado. A primeira característica mais importante para o fluxo que será utilizado como revestimento é a sua extrudabilidade em torno do arame do núcleo. Ele deve aderir tenazmente ao arame e não se deteriorar ou se decompor de maneira prematura com o calor vindo da poça de fusão durante a soldagem.

Os revestimentos são muito complexos em sua composição química, pois tem diversas funções que são conseguidas pela mistura dos diversos elementos adicionados. A tabela 2.5, mostra os materiais da alma do eletrodo mais adequados à soldagem de aços e ferros fundidos, (Ramalho & Gimenes, 1997).

**Tabela 2.5 – Materiais da alma do eletrodo**

<b>Materiais a soldar</b>	<b>Materiais da alma</b>
Aços de baixo teor de carbono e de baixa liga	Aço efervescente (C 0,10 %)
Aços inoxidáveis	Aço efervescente ou aço inoxidável
Ferros fundidos	Níquel puro, liga Fe-Ni, ferro Fundido, aço, bronze, etc

Os eletrodos podem ser classificados segundo a espessura e a composição química do revestimento. O critério de espessura considera como tipos os seguintes eletrodos:

- peculiar ou fino com espessura menor do que 10% do diâmetro da alma, requerendo baixa intensidade de corrente elétrica para ser fundido, em torno de 130 A.
- semi-espesso com espessura entre 10 a 20% do diâmetro da alma. Sua fusão requer um valor de corrente ligeiramente superior ao tipo fino, em torno de 150 A.
- espesso, é o eletrodo em que a faixa de espessura do revestimento encontra-se entre 20 a 40% do diâmetro da alma. Sua fusão requer um valor alto de corrente elétrica, em torno de 170 A.
- muito espesso, essa classificação engloba os eletrodos cujos revestimentos são maiores que 40% da diâmetro da alma. Requer as maiores intensidades de corrente para se fundir, entre 200 a 220 A.

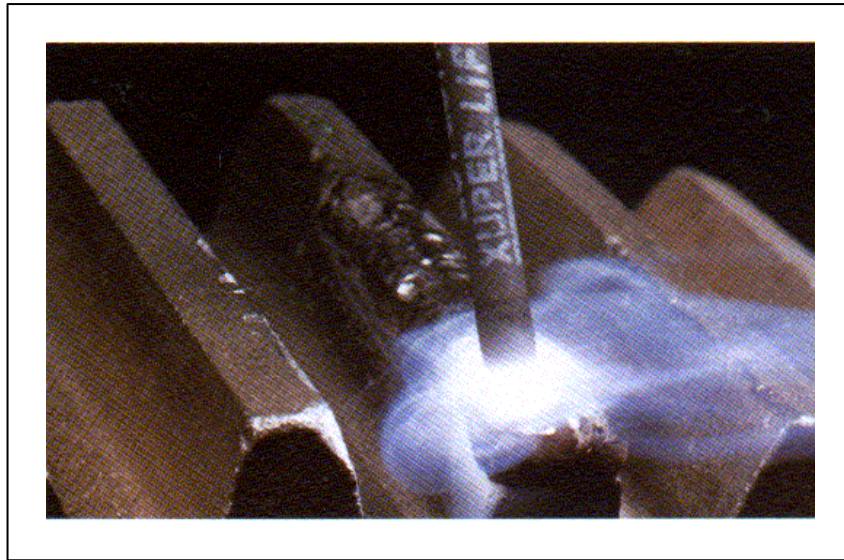
Na composição química do revestimento de um eletrodo, são utilizados diversos componentes químicos com diferentes funções. Nesta classificação, o elemento com maior teor no revestimento é aquele que será utilizado como base. A tabela 2.6, mostra os elementos a serem adicionados para atingir as funções desejadas.

**Tabela 2.6** – Elementos adicionados ao revestimento

<b>Funções desejadas</b>	<b>Elementos adicionados</b>
Formadores de gás	Celulose, dolomita, $\text{CaCO}_3$ , etc.
Formadores de escória e materiais fundentes	Argila, talco, $\text{TiO}_2$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{SiO}_2$ , Fe-Mn, FeO, feldspato, asbestos, etc.
Estabilizadores de arco	$\text{TiO}_2$ , ilmenita, silicatos de Na e K, etc.
Desoxidantes	Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr, etc.
Elementos de liga	Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr, etc.

Dentre todos os processos de soldagem, o processo a arco elétrico com eletrodo revestido(SAER), é o que possui maior flexibilidade entre todos, pois pode ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, etc) com praticamente todas as espessuras do metal base (solda multi-passe) e em áreas de acesso limitado, o que representa uma vantagem muito importante para a soldagem de tubulações, as quais são realizadas no campo e em todas as posições. Além disso, o processo é menos sensível a correntes de ar do que o processo de solda a arco de proteção gasosa (MIG/MAG).

A figura 2.19, mostra foto de uma peça sendo revestida pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.



**Figura 2.19** – Processo de revestimento por Soldagem – (Eutectic&Castolin, 2003).

## 2.4 – MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Muitas ligas de revestimento duro são a base de ferro, porém, algumas delas contém uma grande adição de cromo e carbono. Svensson et al, desenvolveram um estudo para caracterizar a liga (Fe-34Cr-4,5C)% depositada pelo processo de soldagem manual a arco elétrico. Nessas condições, segundo Svensson, essa liga apresentou uma fração volumétrica grande de carbonetos primários, e carbonetos secundários ricos em cromo, dispersos numa matriz ductil. Esses carbonetos, com dureza Vickers, em torno de 1200-1600 HV, proporcionam à matriz boa resistência ao desgaste abrasivo, quando em contato com areia ou outro mineral duro. A matriz por sua vez serve de proteção a esses carbonetos (Svensson et al, 1985).

As ligas Fe-C-Cr empregadas para resistir ao desgaste abrasivo possuem matriz contínua que pode ser austenita metaestável ou martensita à temperatura ambiente, além de apresentar carbonetos do tipo  $M_7C_3$  como fase descontínua. Estas ligas podem possuir composições químicas geralmente compreendidas em teores de carbono entre 1,2% a 4% e teores de cromo entre 6% a 40%. Indicam-se que os teores inferiores a 10% de cromo conduzem a formação do eutético, em que a matriz contínua é na verdade o carboneto  $M_7C_3$  e a fase dispersa é

formada por glóbulos ou bastões da austenita ou produtos da sua transformação (Gregolin, 1990)

Os carbonetos afetam as propriedades mecânicas dos materiais por sua presença dentro dos grãos em nos contornos dos grãos. Dependendo da composição química da liga e do tratamento térmico recebido, podem-se formar distintos tipos de carbonetos, tais como: MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_7$ , onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos (Prisco).

A influência de uma segunda fase no comportamento ao desgaste abrasivo de uma liga pode depender de fatores como: dureza relativa das duas fases, a fração volumétrica de segunda fase, tamanho, forma, estabilidade, coerência e distribuição das partículas. Os efeitos de tais variáveis tem sido estudados, mas ainda não foi possível o estabelecimento claro da relação entre estes fatores e a resistência à abrasão. Isso se deve em parte a diversificação das ligas e dos ensaios utilizados (Gregolin, 1990).

A fração volumétrica dos carbonetos é um dos mais importantes parâmetros microestruturais que afetam a resistência ao desgaste abrasivo. Embora o alto nível de dureza dos carbonetos de cromo tipo  $M_7C_3$  contribuam para a resistência ao desgaste, os mesmos são frágeis e o modo pelo qual estão presos na matriz pode desempenhar um papel importante na ocorrência ou não de trincas durante a abrasão.

Fiore et al, realizaram estudos numa série de ligas de ferro fundido de alto cromo, contendo de 10% a 40% em fração volumétrica de carbonetos de cromo tipo  $M_7C_3$ . Estas ligas foram submetidas a ensaios de desgaste abrasivo em roda de borracha, com utilização de areia ( $SiO_2$ ) semi arredondada e alumina ( $Al_2O_3$ ) AFS 50-70 como abrasivos.

Os ensaios com areia mostraram uma perda de massa mínima, correspondente a uma resistência à abrasão máxima, para frações volumétricas intermediárias, que corresponde à liga de composição eutética. Para ambos os abrasivos, a resistência ao desgaste aumentou com a fração volumétrica de carbonetos nas ligas hipoeutéticas. Para o abrasivo areia, a resistência ao desgaste diminuiu com o aumento da fração volumétrica de carbonetos no intervalo de composição hipereutética devido ao afloramento e trincamento dos carbonetos  $M_7C_3$ . Nesse estudo foi observado que as partículas abrasivas de alumina ( $Al_2O_3$ ), possuem uma dureza comparável a dos carbonetos, enquanto que a dureza da areia é bem menor que a dos carbonetos, (Fiore et al, 1983).

Esta tendência do aumento da resistência ao desgaste com a fração volumétrica dos carbonetos, que foi observada por Fiore et al para ligas hipoeutéticas, é explicada quando se verifica a proteção que esses carbonetos oferecem à matriz. Estudos utilizando ligas hipoeutéticas desgastadas por quartzo, mostraram que a matriz de austenita é

preferencialmente removida em relação aos carbonetos eutéticos  $M_7C_3$  duros que sobressaem em relevo. Os carbonetos são os fatores que controlam a taxa de desgaste das ligas hipoeutéticas, pois a remoção da austenita é impedida pelos pequenos espaços entre os carbonetos. O espaço entre os carbonetos é de aproximadamente  $50\mu\text{m}$ , enquanto as partículas de quartzo tem aproximadamente  $250\mu\text{m}$  de diâmetro. As partículas abrasivas não podem efetivamente penetrar na matriz devido ao espaço fechado da região eutética que contém os carbonetos. Quando aumenta-se os teores de Cr e C, o resultado é que não somente aumenta a fração volumétrica dos carbonetos, mas a largura dos braços das dendritas de austenita diminui. A austenita é protegida das partículas abrasivas pelo aumento da fração volumétrica dos carbonetos. A resistência ao desgaste das ligas hipoeutéticas é, então, aumentada quando C e Cr são adicionados.

As ligas eutéticas agem da mesma maneira que as ligas hipoeutéticas, mas muitos dos carbonetos primários trincam e grandes partes deles são desagregados, deixando a matriz mais exposta e aumentando a taxa de desgaste. Portanto, carbonetos muito grande não aumentam a resistência ao desgaste das ligas, embora observa-se que resistem melhor à abrasão do que a matriz até o ponto em que sofrem trincamento, (Fiore et al, 1983).

Kotecki e Ogborn, demonstraram que é a microestrutura e não a dureza, o principal fator na determinação da resistência à abrasão a baixas tensões em ligas de revestimento a base de ferro.

Dias & Gomes (2003), após desenvolverem um estudo sobre a resistência ao desgaste abrasivo a baixa tensão de revestimentos duros, concluíram que a dureza não afetou a resistência a abrasão das amostras tanto quanto a microestrutura mostrou ser um fator determinante nesses resultados de desgaste abrasivo.

# Materiais e Métodos

## 3.1 – MATERIAIS

### 3.1.1 – Metal de base

O metal de base utilizado para a soldagem dos revestimentos foi o aço ASTM A-36, com as seguintes dimensões: 82 mm de comprimento, 32 mm de largura e 12,7 mm de espessura. Nas tabelas 3.1 e 3.2, são apresentadas a composição química e as propriedades mecânicas nominais deste aço. A composição química bem como as propriedades mecânicas apresentadas são valores característicos fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 3.1** – Composição química do metal de base.

<b>Composição Química (% em peso)</b>					
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>
0,25	0,80 – 1,20	0,040	0,050	0,40	0,20

**Tabela 3.2** – Propriedades mecânicas nominais do metal de base.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
Limite de Escoamento	250 Mpa
Limite de Ruptura	400 – 500 Mpa
Dureza Rockwell	10 HRc

### 3.1.2 – Metal de Adição

Como consumível de soldagem foi utilizado eletrodo revestido do tipo Fe-Cr-C, denominado comercialmente por XHD 6710 da Eutectic&Castolin, com 4 mm de diâmetro. Esse consumível se enquadra na classificação das ligas de revestimento, de acordo com a composição química, como as do grupo 2, mais precisamente na classe dos ferros fundidos austeníticos.

De acordo com o fabricante, o eletrodo XHD 6710 é um eletrodo revestido, com alta taxa de deposição e elevada resistência ao desgaste por abrasão quando submetido a alta pressão, suporta choques moderados e apresenta ausência total de escória. É indicado para aplicações em facas e martelos desfibradores das indústrias sucroalcooleiras, bombas de lama e caçambas de dragas. Sua composição química é apresentada na tabela 3.3.

**Tabela 3.3** – Composição química e dureza do metal de adição.

Eletrodo revestido <b>XHD 6710</b> – Eutectic&Castolin					
Análise Química (%)					Depósito de solda (Dureza – HRc)
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	
5,300	1,250	0,850	42,000	Restante	62,00

### 3.1.3 – Areia

Como material abrasivo, foi utilizado areia de sílica AFS (American Foundry Society) 50/70, denominada comercialmente por Areia Quartzosa Industrial, fornecida pela Empresa Apalan Stones – Comércio de Areia e Pedregulhos, da cidade de Panorama, S. Paulo. Esta areia foi submetida a um peneiramento de modo a adequar a sua granulometria às dimensões especificadas pela norma ASTM G 65-91, que estabelece uma porcentagem de 5% max. de retenção na peneira 50 e 95% min. na peneira 70.

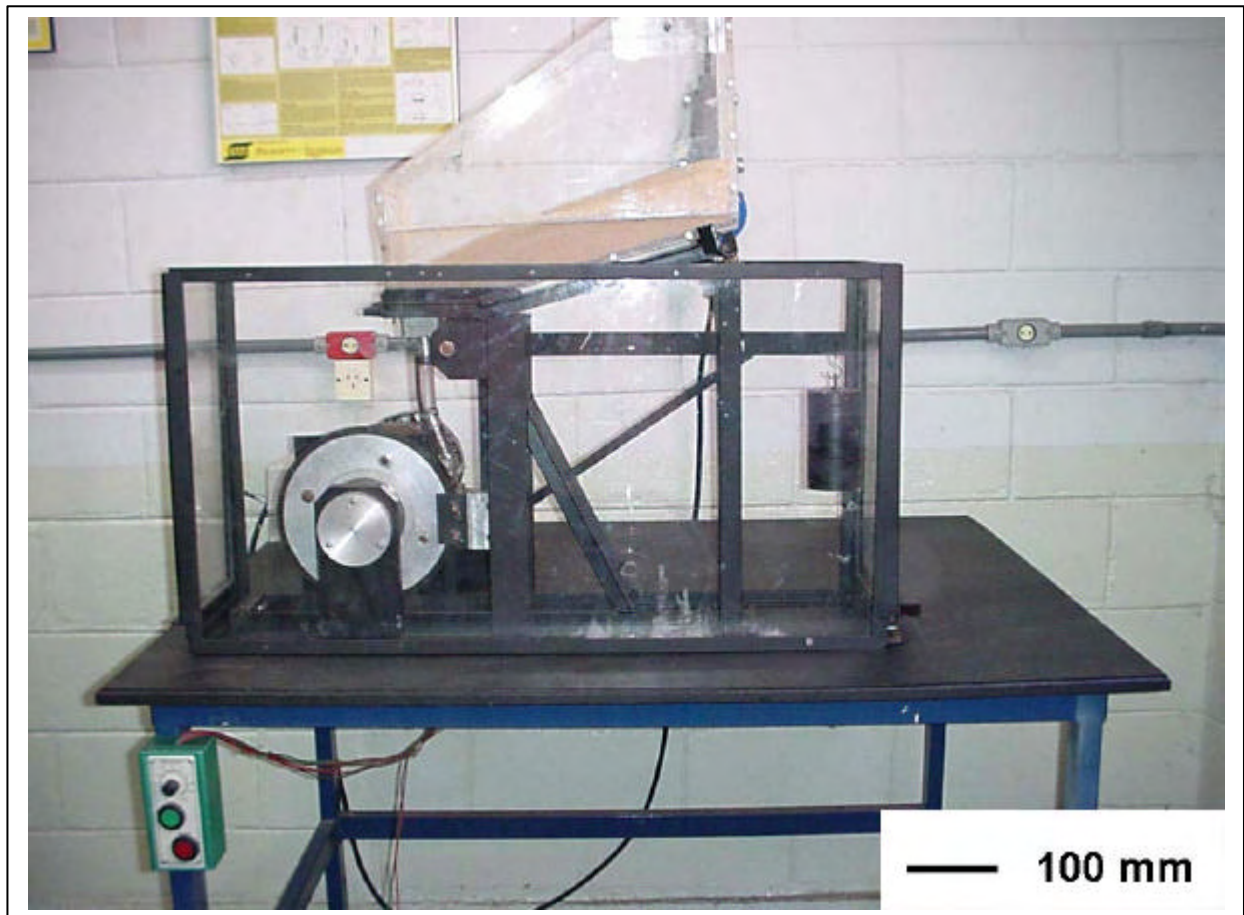
## 3.2 – EQUIPAMENTOS

### 3.2.1 – Fonte de Energia

A fonte de energia empregada para o processo de soldagem foi uma fonte retificadora do tipo tensão constante, modelo TRR 2600, da Bambozzi, com corrente máxima de 430 A, 300 A a 60 %.

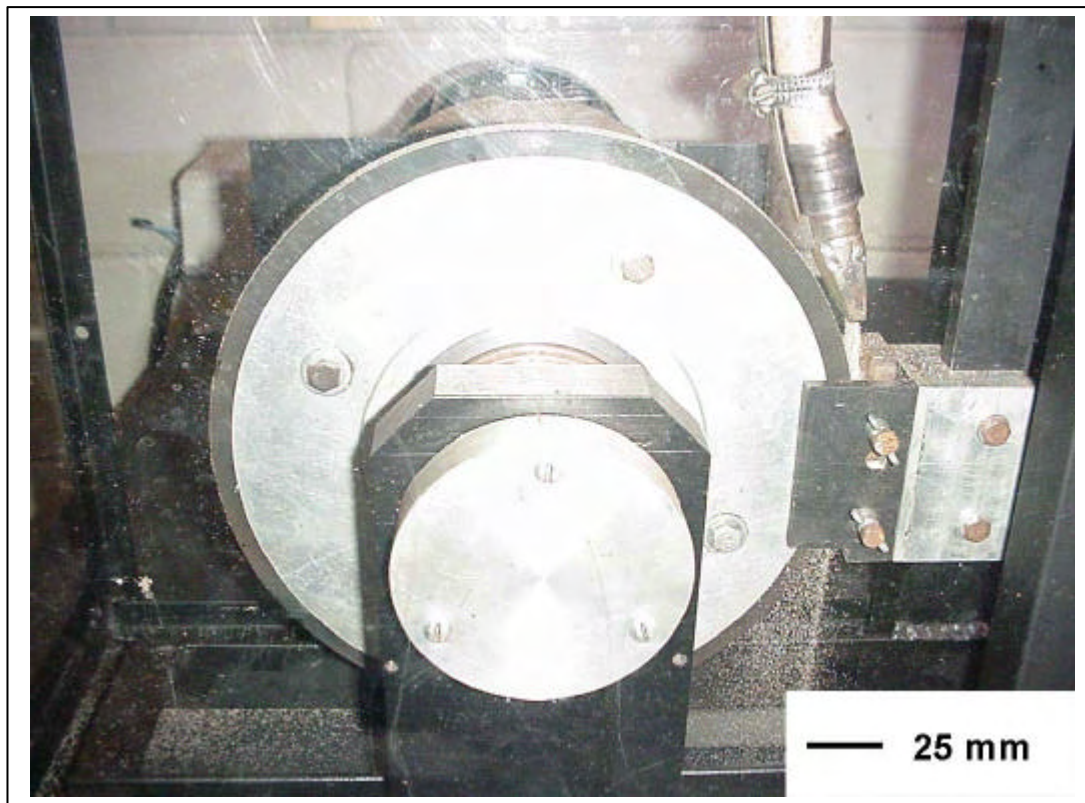
### 3.2.2 – Equipamento para Ensaio de Desgaste

Para os ensaios de desgaste à baixa tensão, foi utilizado o equipamento de roda de borracha do Labsol, Laboratório de Soldagem, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS / UNESP, construído segundo a norma ASTM G 65-91 e mostrado na figura 3.1.



**Figura 3.1** – Equipamento de roda de borracha e areia seca para os ensaios abrasivos.

O anel de borracha utilizado é de clorobutil, com diâmetro externo inicial de 228,6 mm e espessura de 12,7 mm, conforme mostrado em detalhe na figura 3.2, com dureza variando entre 59-60 Shore A, fabricado pela empresa Regigant em Ilha Solteira – S.P.



**Figura 3.2** – Detalhe da amostra, roda de borracha e fluxo de areia durante ensaio de desgaste.

### 3.2.3 – Sistema de Peneiramento da Areia

Como já foi citado o peneiramento da areia foi desenvolvido pela Empresa Apalan Stones – Comércio de Areia e Pedregulhos, da cidade de Panorama, S. Paulo. A granulação dessa areia foi conferida no laboratório de soldagem com o auxílio de um sistema de peneiras superpostas com malhas 50 e 70 de acordo com a norma AFS (American Foundry Society), marca SOLOTEST, conforme mostra a figura 3.3.



**Figura 3.3** – Sistema de peneiras, empregado na conferência da granulação da areia.

### 3.2.4 – Corte, Usinagem e Pesagem das amostras

As amostras foram cortadas em uma máquina de corte tipo CUT-OFF, com refrigeração à água, utilizando-se disco abrasivo de alta rotação (3600 rpm).

Os corpos de prova, para o ensaio de desgaste, foram usinados diretamente numa retificadora plana manual, marca FERDIMAT FRP 300, com rebolo abrasivo Norton A 36 QVBE, devido à dureza dos revestimentos, fato este que não permitiu utilizar inicialmente uma plaina.

As medidas da massa dos corpos de prova, antes e após o ensaio de desgaste, para a determinação das perdas de massa, foram realizadas no Laboratório de Química da UNESP, em balança de precisão marca MARTE – modelo AL 200C, com sensibilidade de leitura  $10^{-3}$  g e capacidade máxima de 200 g e mínima 0,02 g.

### 3.2.5 – Análise de Dureza e Metalografia

As medidas de dureza foram realizadas com durômetro marca HECKERT Tipo HPO – 250 em escala Vickers, com carga de 150 kgf. Os trabalhos de microscopia ótica foram

realizados no Laboratório de Microscopia da Unesp, em Bancada Metalográfica NEOPHOT-21, com aumento máximo de 1000 X.

### **3.3 – MÉTODOS**

A fim de que os objetivos desse trabalho fossem alcançados com êxito, fez-se necessário o cumprimento de uma série de etapas, a saber:

- Planejamento experimental: especificação das variáveis a serem estudadas tais como: corrente, velocidade de soldagem e avaliação da morfologia do cordão de solda, bem como sua geometria e diluição.
- Preparação e realização dos experimentos: após o ajuste das variáveis de acordo com o planejamento anterior, realizaram-se os experimentos e obtiveram-se os resultados necessários.

#### **3.3.1 – Planejamento Experimental**

Nessa etapa, foram definidas quais os parâmetros, deveriam ser variados durante a soldagem de revestimento. As variáveis definidas foram: corrente (100 A, 120 A, 140 A, 160A e 180 A) e suas respectivas velocidades.

Os limites de correntes adotados, tiveram como base os valores recomendados pelo fabricante, que estabelece para o eletrodo de bitola 4,00 mm, uma corrente entre 140 a 170 A. Além disso, os parâmetros estabelecidos darão subsídios para a análise da morfologia dos cordões de solda, da geometria desses cordões, bem como para análise metalográfica dos mesmos.

## 3.3.2 – Realização dos experimentos

### 3.3.2.1 – Soldagem dos Revestimentos

Antes da realização da soldagem, foi necessário uma preparação das amostras a serem soldadas, a qual é apresentada a seguir.

Foram cortadas 30 chapas de aço A-36 nas dimensões 82 x 32 x 12,7 mm sendo posteriormente lixadas para eliminar a carepa e fixadas pelas extremidades numa mesa com tampo de chapa de aço, de espessura ½”, por soldagem com eletrodo revestido, para minimizar as distorções durante a soldagem dos revestimentos.

As soldagens foram realizadas na Indústria Pioneiros na cidade de Sud Minucci – S.P, empresa do ramo sucro-alcooleiro de forma manual, como é feito normalmente nos processos de soldagem de manutenção realizados por essa indústria. Para cada corrente de soldagem, revestiu-se 3 chapas, isto é, confeccionou-se 3 corpos de prova para cada corrente de soldagem. As combinações dos parâmetros de soldagens (Corrente e Velocidade de Soldagem), foram obtidas em ensaios preliminares em chapa de aço auxiliar, após então realizou-se a soldagem dos revestimentos no metal de base A-36, cujos valores dos parâmetros de corrente foram variados no próprio equipamento de soldagem e o parâmetro velocidade foi verificado através de cronômetro, medindo assim a velocidade de soldagem em cada corpo de prova.

A tabela 3.4 apresenta os valores empregados durante a soldagem.

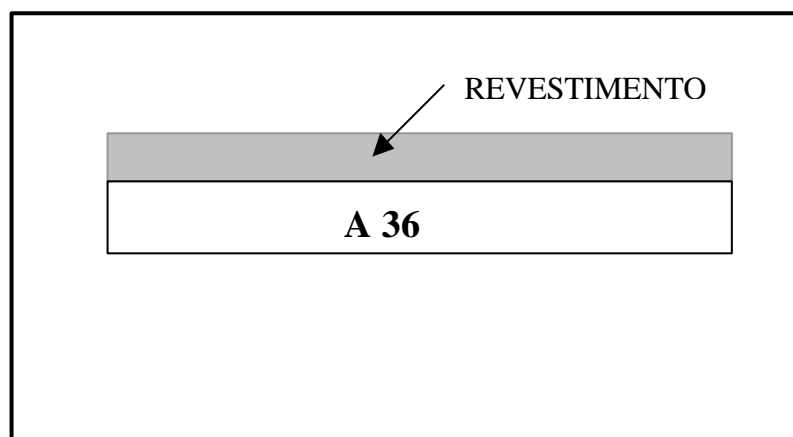
**Tabela 3.4** – Parâmetros de soldagem para uma e duas camadas, utilizados no revestimento das amostras.

UMA CAMADA			DUAS CAMADAS		
Amostra	Corrente	Veloc.	Amostra	Corrente	Veloc.
	(A)	(mm/min)		(A)	(mm/min)
<b>100<sup>A</sup></b>	100	300	<b>100D</b>	100	300
<b>120<sup>A</sup></b>	120	300	<b>120D</b>	120	300
<b>140<sup>A</sup></b>	140	300	<b>140D</b>	140	300
<b>160<sup>A</sup></b>	160	300	<b>160D</b>	160	300
<b>180<sup>A</sup></b>	180	300	<b>180D</b>	180	300

Para a realização das camadas de revestimento, inicialmente foram feitos cordões longitudinalmente ao seu comprimento, sobre a face de 32 mm, um cordão em cada borda, sendo preenchido em seguida toda a amostra. Antes de se iniciar a soldagem de um novo cordão, realizou-se a escovação do cordão anteriormente depositado para a eliminação de pós óxidos, fuligem, carepa, etc. Foram necessários de 3 a 5 cordões, para a formação total da camada de revestimento.

Para evitar superaquecimentos, manteve-se uma temperatura de interpasse de 200 °C. O intervalo de tempo entre a deposição dos cordões era controlada pela temperatura da amostra, monitorada por um pirômetro a laser, que era direcionado ao cordão de solda após a sua confecção.

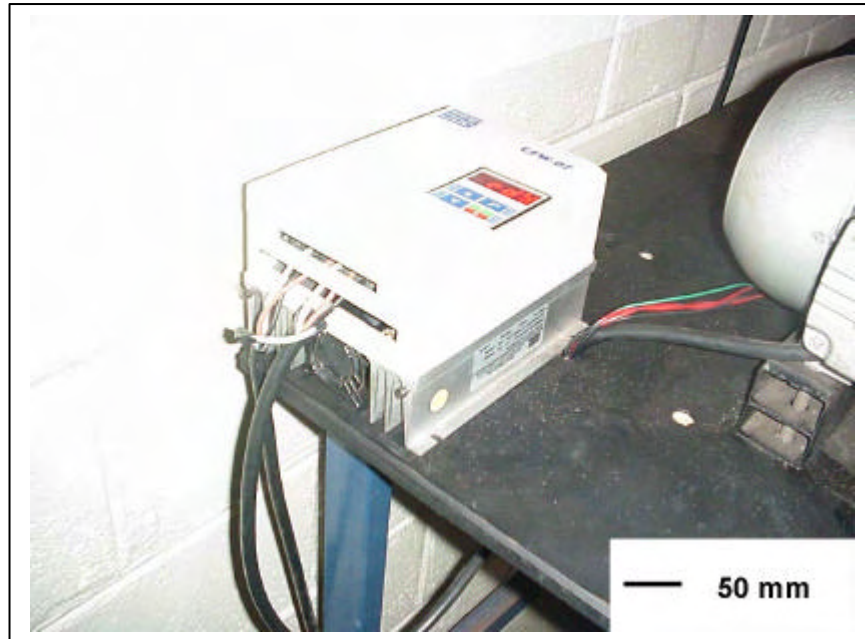
A figura 3.4, mostra o esquema representativo da deposição dos cordões de revestimento no corpo de prova.



**Figura 3.4** – Esquema representativo da deposição dos cordões de revestimento.

### 3.3.2.2 – Ensaio de Desgaste Abrasivo à Baixa Tensão

Os corpos de prova foram preparados e ensaiados segundo os procedimentos da norma ASTM G 65-91, no equipamento denominado Roda de Borracha mostrado na figura 3.3 e 3.4. A força exercida pelo corpo de prova sobre a roda de borracha, de acordo com a norma foi de 130 N. Para controlar a rotação do motor, foi instalado um inversor de frequência marca WEG CFW-07.3AC, mostrado na figura 3.5.



**Figura 3.5** - Inversor de frequência

A rotação da roda de borracha foi fixada em 200 rpm, para um ensaio de 6000 ciclos, portanto 30 minutos para cada ensaio. Para a contagem do número de giros foi instalado um contador com tecnologia microprocessada marca INCON CM8000IVS.

Para a retificação da superfície do anel de borracha, quando necessário, foi empregada uma lixa 320 mesh, a qual foi introduzida entre a roda e uma amostra, presa ao porta amostras, sem pressão, conservando apenas a pressão do braço da alavanca, e deixando a roda girar, a baixa rotação, por alguns minutos, até a retificação do anel de borracha.

O fluxo de areia durante os ensaios foi mantido em 380 gramas/minuto, vazão estabelecida pela norma ASTM G 65/91.

Após a soldagem de revestimento dos corpos de prova, os mesmos foram retificados em todo o seu contorno, até atingirem o tamanho determinado pela norma (1" x 3" x ½"), com esse procedimento, procurou-se eliminar as regiões com descontinuidades.

Antes de iniciar os ensaios abrasivos das amostras, foram realizados dois ensaios com corpos de provas nas mesmas condições, a fim de aferir o equipamento. Após cada ensaio, realizou-se a operação de retificação do anel de borracha, evitando assim que a região desgastada no revestimento adquirisse uma forma trapezoidal. Como o ensaio abrasivo e a própria retificação da roda de borracha resulta em diminuição do diâmetro, ou seja menor que o diâmetro original de 228,6 mm, tomou-se o cuidado de corrigir as perdas de massa e de

volume. Esse procedimento é recomendado pela a norma ASTM G 65/91, e é calculado pela equação 1:

$$PV_c = \frac{PV \times 228,6}{D_r} \quad (1)$$

Onde:

$PV_c$  = Perda de Volume Corrigido

$PV$  = Perda de Volume do Corpo de Prova

$D_r$  = Diâmetro da Roda após uso (mm)

### 3.3.2.3 – Ensaio de Dureza

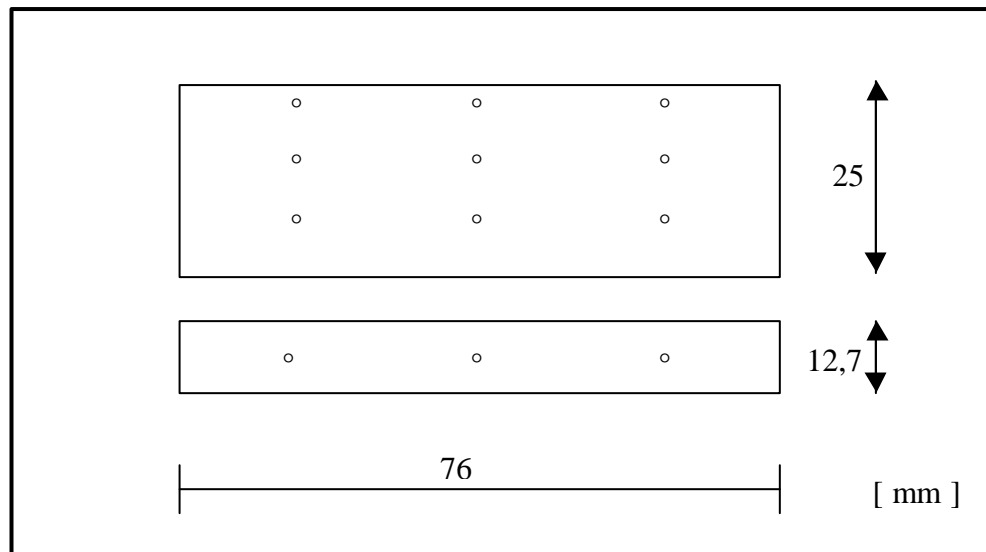
Para a determinação da dureza utilizou-se a escala Vickers, com carga de 150 Kgf. Previamente as medições realizou-se a aferição do aparelho, através da utilização de corpos de prova de dureza padronizada.

As medidas de dureza foram realizadas nos corpos de prova soldados com uma e duas camadas, a saber, foram feitas medidas de dureza na face do revestimento, nas laterais dos cordões de revestimento, bem como no metal de base conforme figura 3.6.

Para serem submetidos ao ensaio de dureza, essas corpos de prova, sofreram lixamento seqüencial, na sua seção longitudinal e na superfície revestida, com lixas de numeração 240, 320, 400 e 600 mesh, e em seguida, polidos com abrasivo de alumina com granulação de 0,5  $\mu\text{m}$  e 1,0  $\mu\text{m}$  na sua seção longitudinal, bem como na superfície revestida, na sequência essas regiões polidas foram atacadas por 15 segundos com reagente de mistura de ácidos utilizado para ferro fundido de alto cromo (90 ml de álcool etílico, 5 ml de HCl, 2,5 g de FeCl, 5 g de ácido pícrico).

Esse processo é necessário para revelar a profundidade de penetração do cordão no metal de base, a ZAT (zona afetada termicamente) e a taxa de diluição.

Ver figura 3.6.



**Figura 3.6** – Esquema representativo das medidas de dureza.

### 3.3.2.4 – Análise Metalográfica e da Diluição

O material para análise metalográfica foi obtido a partir de amostras cortadas transversalmente dos corpos de prova. Posteriormente, as mesmas foram lixadas seqüencialmente na sua seção transversal, com lixas 240, 320, 400 e 600 mesh, e em seguida, polidas com abrasivo de alumina de granulação 0,5 e 1,0  $\mu\text{m}$  e atacadas com reagente de mistura de ácidos utilizado para ferro fundido de alto cromo (90 ml de álcool etílico, 5 ml de HCl, 2,5 g de FeCl, 5 g de ácido pícrico).

Todo esse procedimento, tem o objetivo de além de se fazer a análise metalográfica dos corpos de prova, pela verificação da microestrutura do metal fundido e da dureza dos carbonetos e da matriz, medir também a taxa de diluição através da relação entre as áreas do metal de base fundido e do metal de solda depositado.

# Resultados e Discussões

## 4.1 – RESULTADOS OBTIDOS

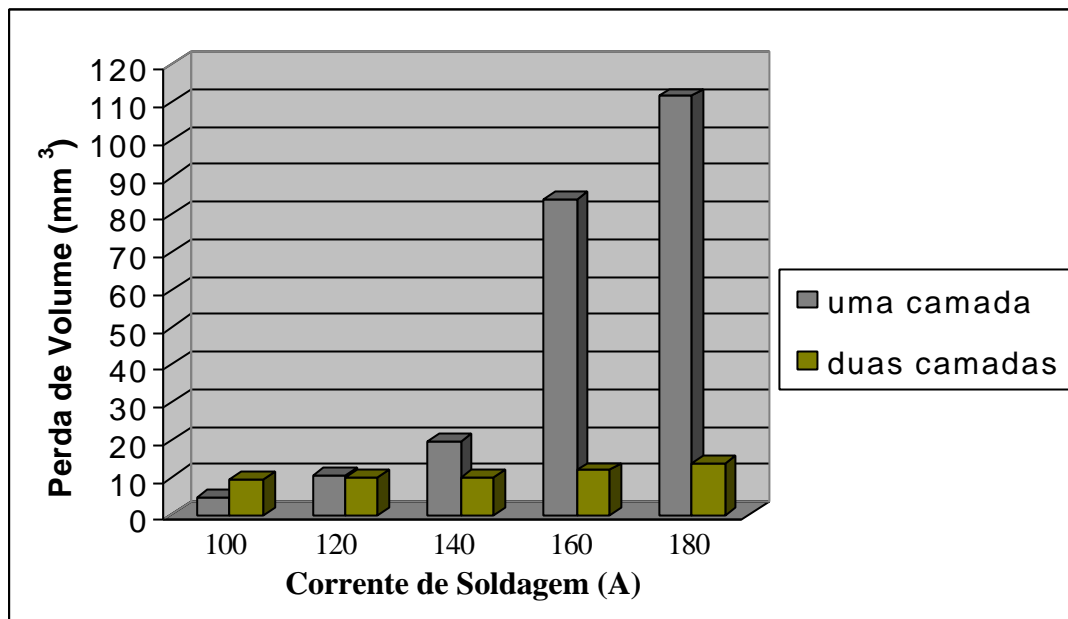
Os resultados conseguidos mediante a utilização da metodologia descrita no capítulo Materiais e Métodos serão apresentados a seguir.

Inicialmente são mostrados os resultados experimentais obtidos no ensaio de resistência ao desgaste por abrasão em amostras revestidas por uma e duas camadas depositadas pelo processo de soldagem com eletrodo revestido tipo Fe-Cr-C, da Eutectic&Castolin.

A seguir, são apresentados os resultados de dureza do revestimento, diluição, geometria do cordão, trincas superficiais, taxa de deposição e os resultados de análises microestruturais.

## 4.2 - RESISTÊNCIA AO DESGASTE

A figura 4.1 apresenta uma comparação da perda de volume durante os ensaios de desgaste em função das correntes de soldagem utilizadas no revestimento. Os valores da perda de volume, são as médias de todos os ensaios realizados.



**Figura 4.1** – Valores da perda de volume médio para uma e duas camadas de revestimento em função da corrente de soldagem.

Podemos verificar na figura 4.1, um crescente aumento de perda de volume das amostras com uma camada a medida em que se aumentou a corrente de soldagem, enquanto que para as amostras com duas camadas, a perda de volume permaneceu praticamente constante, esse resultado verificado se deve ao fato de que a medida em que se aumentava a corrente aumentava-se também a taxa de diluição do metal de base para as amostras com uma camada, quanto as amostras de duas camadas, esses resultados mostram que não houve grande influência da taxa de diluição na segunda camada.

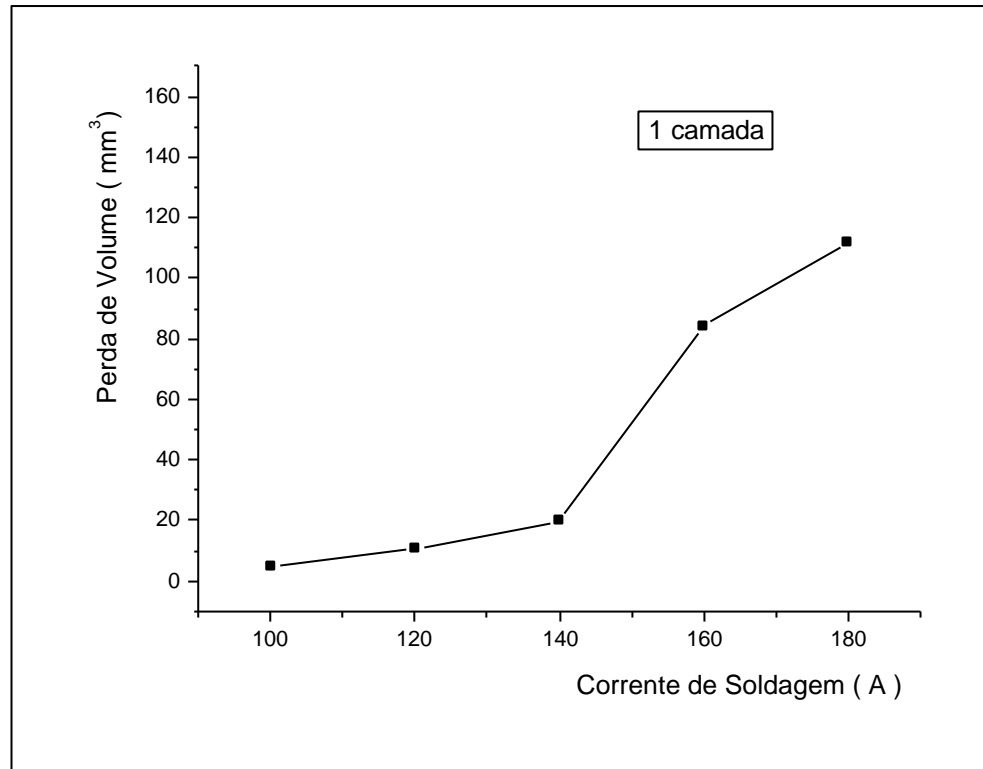
#### 4.2.1 – Depósitos com uma camada

Os resultados da resistência ao desgaste por abrasão à baixa tensão (perda de volume em mm<sup>3</sup>), para depósitos com uma camada soldados com correntes de 100 A, 120 A, 140 A, 160 A e 180 A, com suas respectivas velocidades de soldagem, voltagem e aportes térmicos são apresentados na tabela 4.1

**Tabela 4.1** - Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>					
CORRENTE (A)	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A
VOLTAGEM (V)	29	29	29	29	29
VEL. MÉDIA DE SOLDAGEM (mm/min)	300	300	300	300	300
APORTE TÉRMICO (kJ/mm)	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04
PERDA DE MASSA (g)	0,0369	0,0831	0,1511	0,6569	0,8707
PERDA DE VOLUME ( $\text{mm}^3$ )	4,73	10,65	19,73	84,22	111,63

A figura 4.2 mostra a relação entre perda de volume e a corrente de soldagem para os depósitos com uma camada, onde podemos observar que o aumento da corrente de soldagem resulta num aumento da perda de volume, sendo esta relação devido ao aumento da diluição, ou seja, a medida em que se aumenta a corrente aumenta-se a taxa de diluição, e portanto alta taxa de diluição, propicia a formação de microestruturas com baixa fração volumétrica de carbonetos primários de cromo.



**Figura 4.2** - Perda de Volume (mm<sup>3</sup>) em função da Corrente de Soldagem (A)

### 4.2.2 – Depósitos com duas camadas

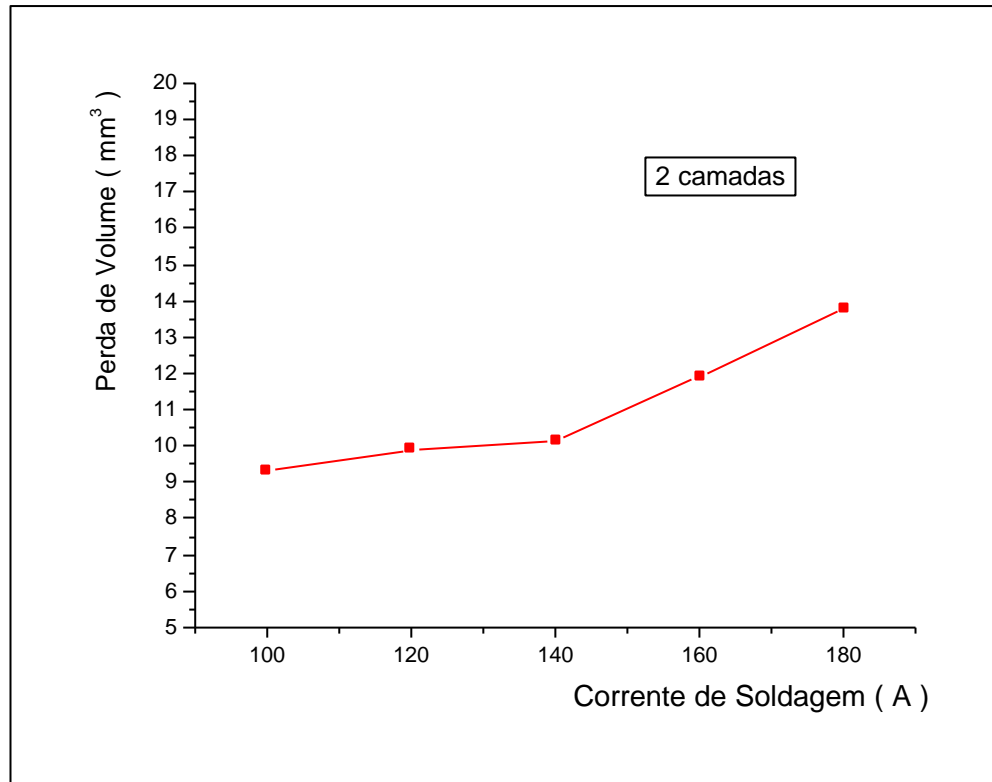
Com o objetivo de comparar a resistência ao desgaste em função do número de camadas, foram feitos ensaios com um mesmo número de corpos de provas com duas camadas de solda.

A tabela 4.2 apresenta os resultados da perda de volume, para depósitos com duas camadas, obtidos com correntes de 100 A, 120 A, 140 A, 160 A e 180 A, com suas respectivas velocidades de soldagem, voltagem e aportes térmicos.

**Tabela 4.2** - Perda de Volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas.

<b>DUAS CAMADAS</b>					
CORRENTE (A))	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A
VOLTAGEM (V)	29	29	29	29	29
VEL. MÉDIA DE SOLDAGEM  (mm/min)	300	300	300	300	300
APORTE TÉRMICO  (kJ/mm)	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04
PERDA DE MASSA  (g)	0,0726	0,0773	0,0790	0,0928	0,1076
PERDA DE VOLUME  ( $\text{mm}^3$ )	9,31	9,91	10,13	11,90	13,80

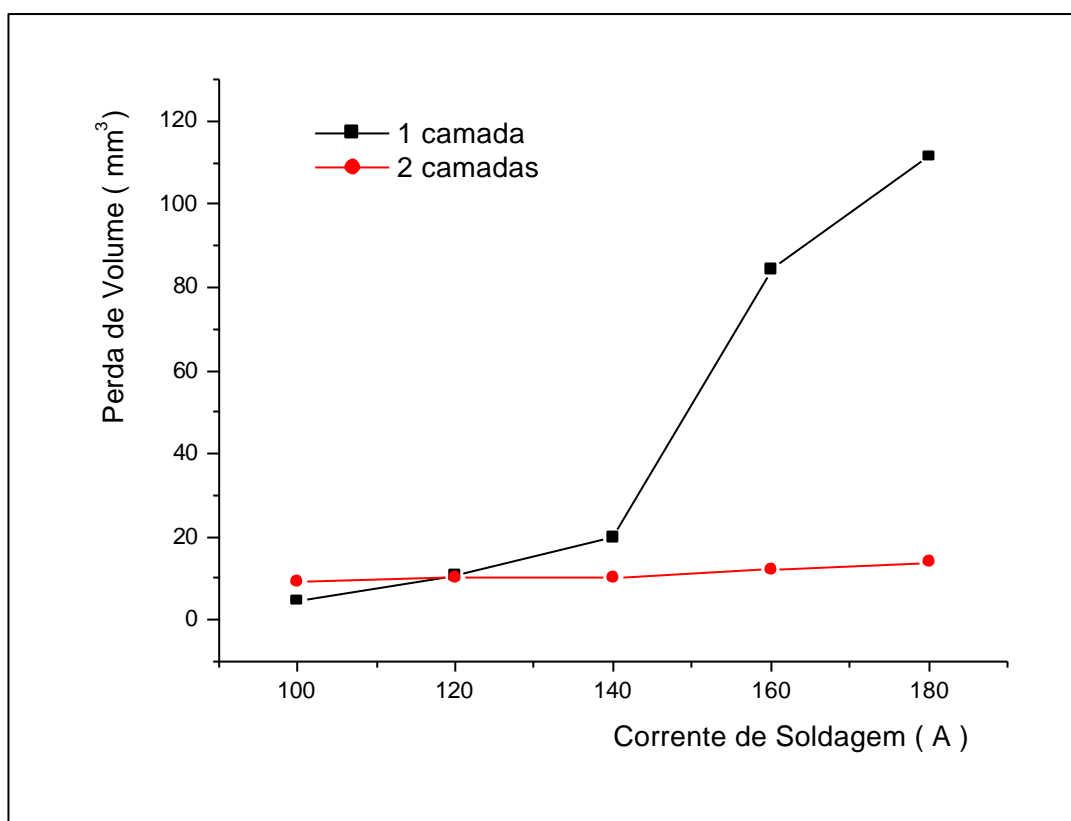
A figura 4.3 mostra a relação entre perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) e corrente de soldagem (A), para os depósitos com duas camadas.



**Figura 4.3** - Perda de volume (mm<sup>3</sup>) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas.

Observa-se através da figura 4.3 que mesmo havendo um grande aumento da corrente de soldagem, o aumento da perda de volume é muito pequeno, isto é, a perda de volume quase que permanece constante. Essa constatação ainda é mais evidente, quando comparamos os resultados da perda de volume dos corpos de prova de uma camada, soldados com altas correntes e por isso com alta taxa de diluição do metal de base e os corpos de prova de duas camadas soldados nas mesmas condições, apresentando baixa taxa de diluição do metal de base na segunda camada.

A figura 4.4 apresenta um gráfico comparativo entre as perdas de volume dos corpos de prova de uma camada e os corpos de prova de duas camadas. Verificamos portanto que o responsável para que esses corpos de provas soldados nas mesmas condições tivessem perdas de volume diferentes, foi o aumento da fração volumétrica dos carbonetos na matriz eutética nos corpos de prova com duas camadas, confirmando o efeito da diluição no resultado final da resistência ao desgaste.



**Figura 4.4** - Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da corrente de soldagem (A) para depósitos com uma e duas camadas.

### 4.3 – DUREZA

Os resultados dos valores médios de dureza são apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 para os corpos de prova de uma e duas camadas.

Durante as medições, verificou-se que não ocorreram grandes variações de dureza para uma mesma amostra, tanto na face de revestimento quanto na seção transversal da amostra. Todavia, analisando o conjunto de amostras, verificou-se que para os corpos de prova de uma camada, ao calcular a média de dureza em cada corpo de prova, houve uma discreta diminuição da dureza à medida em que se aumentava a corrente de soldagem., ou seja, houve uma diferença de 142,17 HV ou 5,4 HRc entre a maior e a menor dureza

Já para os corpos de prova de duas camadas essa variação foi mais discreta ainda, ou seja, a variação não obedeceu uma tendência decrescente como ocorreu nos corpos de prova

de uma camada, isto é, em 100 A apresentou a maior dureza, logo em seguida, a 120 A apresentou uma dureza bem baixa, em seguida, a 140 A a dureza voltou a subir, atingindo a menor dureza a 160 A, e novamente chegando quase que à máxima dureza em 180 A. Verificou-se que houve uma diferença entre a maior e a menor dureza medida de 51,67 HV ou 1,58 HRC. Observamos portanto que em média os corpos de prova de 2 camadas, apresentaram uma dureza 3 vezes maior que os corpos de prova de uma camada.

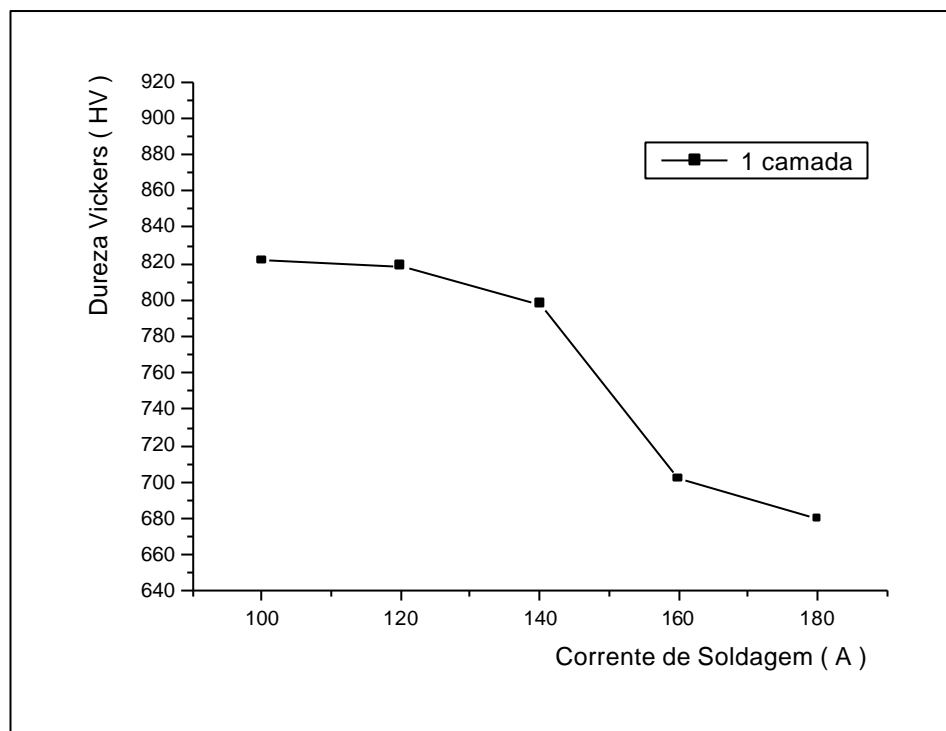
**Tabela 4.3** - Ensaio de dureza Vickers e Rockwell C para corpos de prova de 1 camada

<b>DUREZA DA FACE E METAL DE BASE – (01 CAMADA)</b>									
100 A		120 A		140 A		160 A		180 A	
FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.	
HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
835	65	792	64	752	62,5	681	59,4	681	59,4
803	64	772	63,3	792	64	634	57,3	599	55,5
792	64	824	64,3	824	64	824	64	743	62
772	63,3	882	66,4	824	64	698	60	743	62
824	64	824	64	824	64	642	57,3	665	58,7
907	67	824	64	772	63,3	734	61,7	649	57,5
<b>MÉDIAS</b>									
822,2	64,6	819,67	64,3	798	63,6	702,17	60	680	59,2
<b>MÉDIA DA DUREZA DO METAL DE BASE:- 148,33 H Vickers = 78,3 HRB</b>									

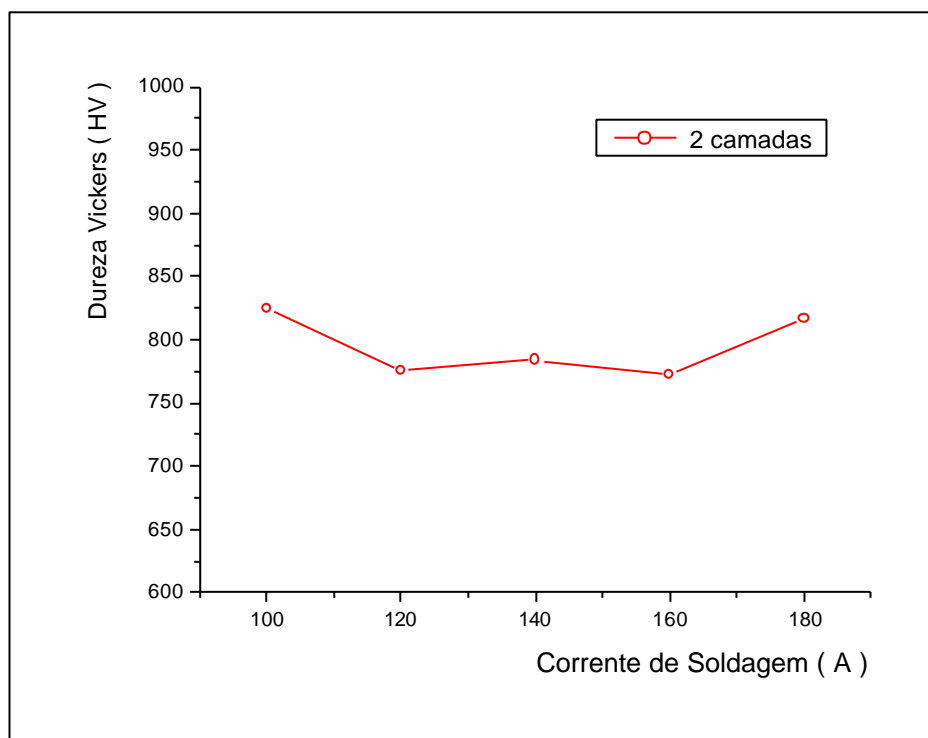
**Tabela 4.4** - Ensaio de dureza Vickers e Rockwell C para corpos de prova de 2 camadas

DUREZA DA FACE E METAL DE BASE – (02 CAMADAS)									
100 A		120 A		140 A		160 A		180 A	
FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.		FACE DE REVEST.	
VICKERS	HRC	VICKERS	HRC	VICKERS	HRC	VICKERS	HRC	VICKERS	HRC
792	64	752	62,5	824	64	743	62,5	813	64,3
803	64	824	64	752	62,5	792	64	813	64,3
894	66,5	724	61	752	62,5	772	63,3	734	61,7
824	64,3	792	64	803	64	752	62,5	813	64,3
870	66,15	762	62	824	64	752	62,5	882	65,4
762	62	803	64	752	62,5	824	64	847	63,5
MÉDIAS									
824,17	64,5	776,17	62,92	784,5	63,25	772,5	63	817	63,9
MÉDIA DA DUREZA DO METAL DE BASE:- 148,33 H Vickers = 78,3 HRB									

As figuras 4.5 e 4.6 mostram a relação entre dureza e corrente de soldagem apresentados na tabela 4.3 e 4.4, para depósitos com uma e duas camadas, respectivamente.

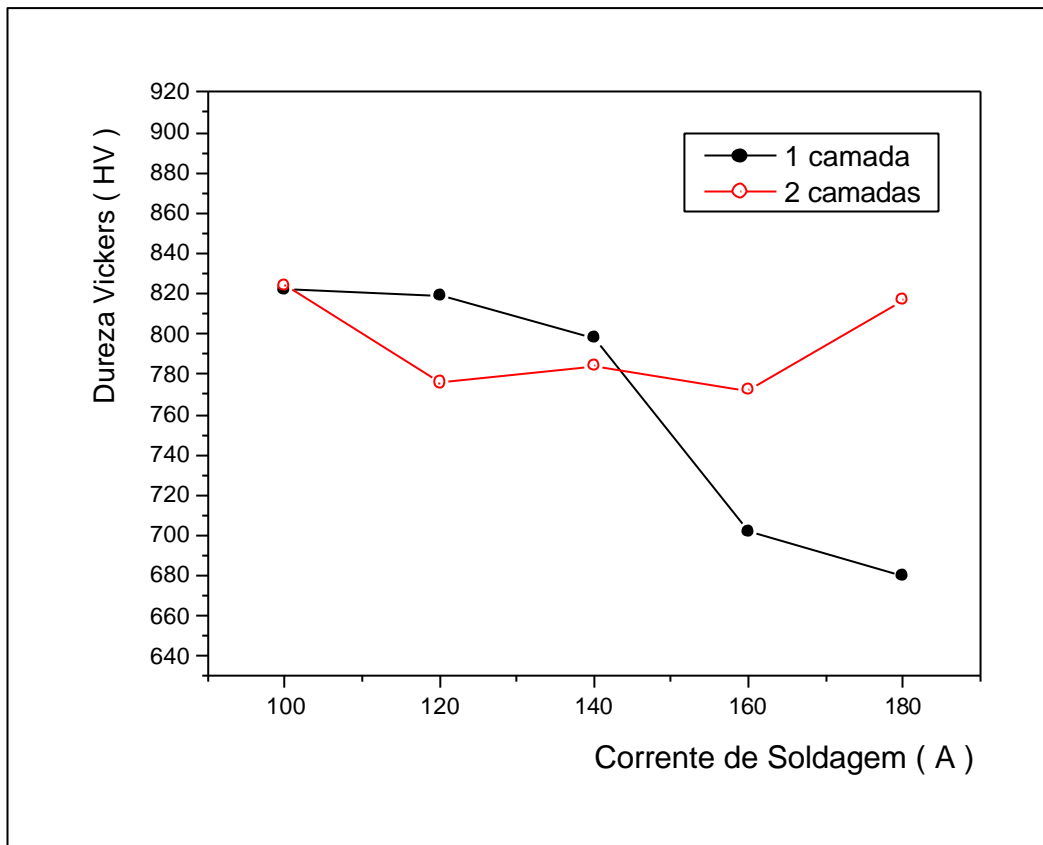


**Figura 4.5 :** Relação entre a dureza do revestimento e a corrente de soldagem (A) para depósitos com uma camada.



**Figura 4.6:** Relação entre a dureza do revestimento (HV) e a corrente de soldagem (A) para depósitos com duas camadas.

A figura 4.7 apresenta um gráfico comparativo entre dureza dos corpos de prova de uma camada e os corpos de prova de duas camadas.



**Figura 4.7:** Relação entre a dureza do revestimento (HV ) e a corrente de soldagem (A) para depósitos com uma e duas camadas.

As tabelas 4.5 e 4.6 mostram uma relação entre a dureza e a perda de volume dos corpos de prova com uma e duas camadas.

**Tabela 4.5** - Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da dureza (HV) e da corrente de soldagem (A) para uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>					
CORRENTE (A)	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A
DUREZA (Hvickers)	822,17	819,67	798	702,17	680
PERDA DE MASSA (g)	0,0369	0,0831	0,1511	0,6569	0,8707
PERDA DE VOLUME ( $\text{mm}^3$ )	4,73	10,65	19,73	84,22	111,63

**Tabela 4.6** - Perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) em função da dureza (HV) e da corrente de soldagem (A) para duas camadas.

<b>DUAS CAMADAS</b>					
CORRENTE (A)	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A
DUREZA (Hvickers)	824,17	776,17	784,5	772,5	817
PERDA DE MASSA (g)	0,0726	0,0773	0,0790	0,0928	0,1076
PERDA DE VOLUME ( $\text{mm}^3$ )	9,31	9,91	10,13	11,90	13,80

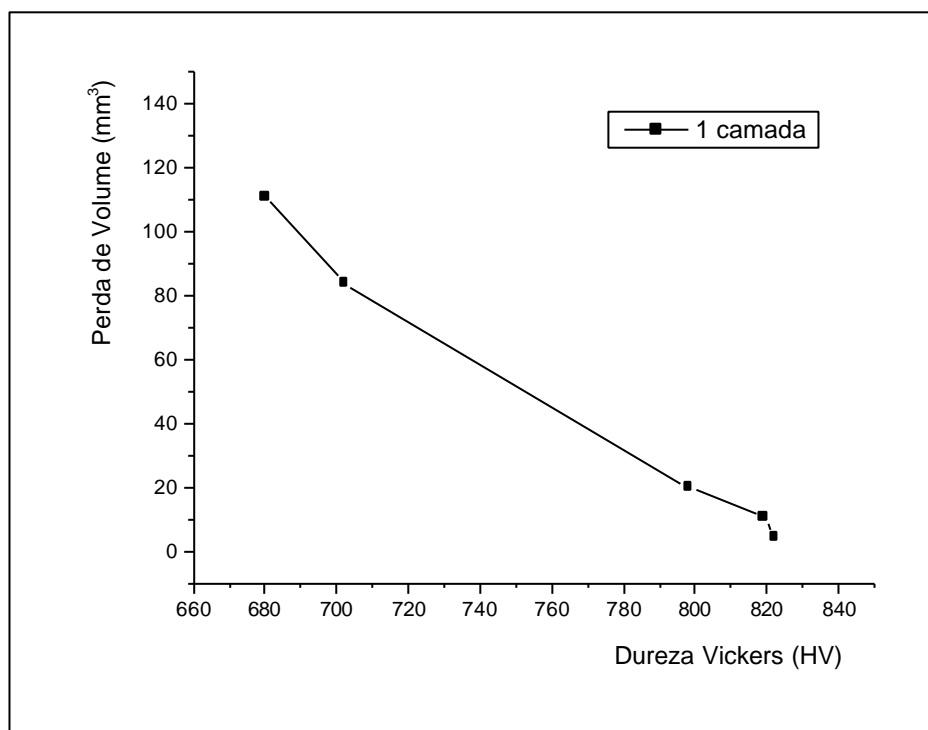
Ao analisarmos a dureza com a perda de volume dos corpos de prova de uma e duas camadas, verificamos que nos corpos de prova de uma camada a maior diferença de dureza ocorreu para as amostras de 100 A (com maior valor de dureza) e 180 A (com menor valor de dureza), coincidindo respectivamente com o menor e maior valor de perda de volume obtido.

Para os corpos de prova de duas camadas, os valores de dureza do revestimento, mostraram um comportamento mais aleatório na sua relação com a perda de massa, ou seja, não obedeceu uma tendência da menor para a maior corrente de soldagem como ocorreu com os corpos de prova de uma camada.

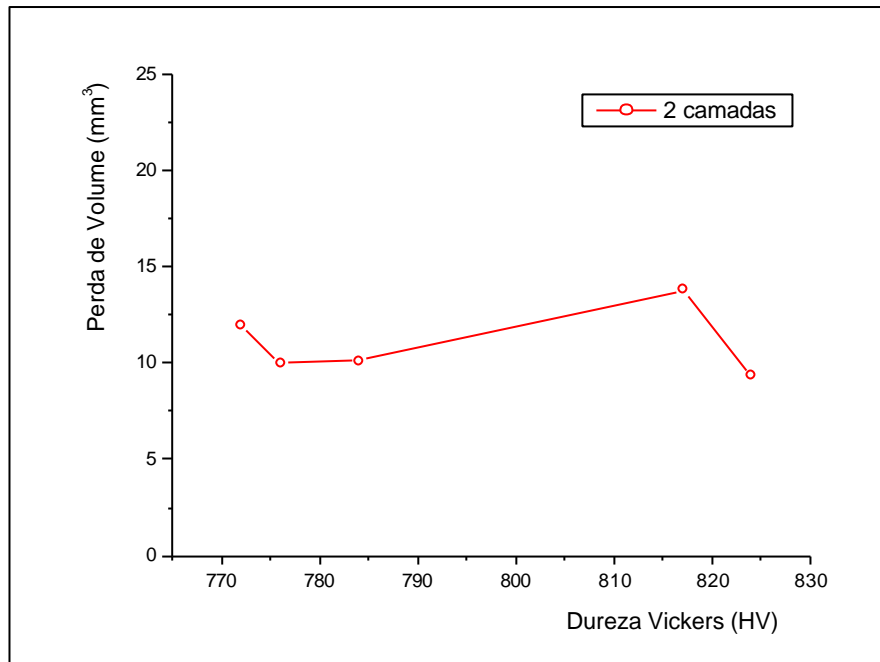
Em média considerando todos os corpos de prova de uma camada, houve uma perda de volume de aproximadamente 46,19%, enquanto que os corpos de prova de duas camadas apresentaram uma perda de volume média de 11,01%, ou seja, podemos dizer que os corpos de prova de duas camadas, apresentaram em média uma resistência ao desgaste abrasivo aproximadamente quatro vezes maior que os corpos de prova de uma camada.

Essa maior dureza dos corpos de prova de duas camadas, que resultou numa menor perda de volume é devido fundamentalmente à baixa taxa de diluição do metal de base na segunda camada. Como na segunda camada não existe a interferência do metal de base, esta ficou rica em carbono e cromo, facilitando assim a formação de carbonetos de cromo, responsáveis pela diminuição da perda de volume.

As figuras 4.8 e 4.9, apresentam os gráficos representativos entre a perda de volume e a dureza do revestimento para uma e duas camadas, respectivamente.

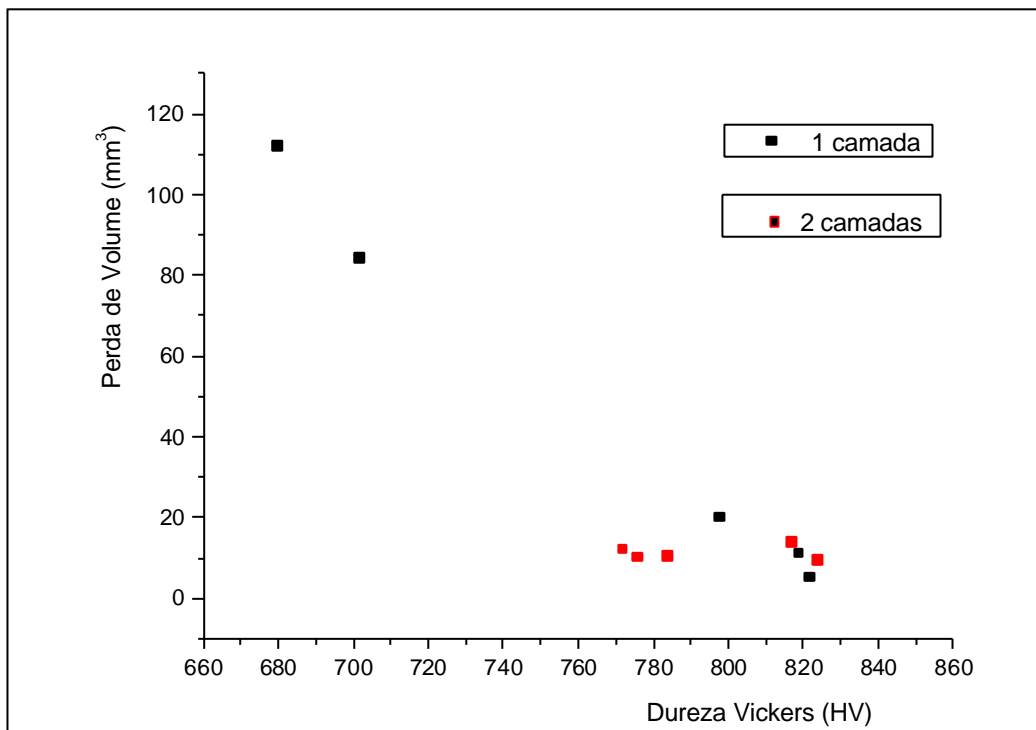


**Figura 4.8** - Perda de volume (mm<sup>3</sup>) em função da dureza (HV) para depósitos com uma camada.



**Figura 4.9** - Perda de volume (mm<sup>3</sup>) em função da dureza (HV) para depósitos com duas camadas.

A figura 4.10 apresenta o gráfico comparativo entre a perda de volume e a dureza do revestimento para depósitos com uma e duas camadas.



**Figura 4.10** - Relação entre dureza do revestimento e a perda de volume (mm<sup>3</sup>) para depósitos com uma e duas camadas.

De acordo com a figura 4.10 observa-se que existe uma certa relação entre dureza de revestimento e perda de volume, principalmente no revestimento de uma camada onde a taxa de diluição teve grande influência na diminuição da dureza, porém, para o ensaio de duas camadas, verifica-se um comportamento mais aleatório de perda de volume, onde não teve uma relação direta entre dureza de revestimento e perda de volume.

Esses resultados mostram que a dureza não é o indicativo mais adequado para se prever a resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão, principalmente para revestimentos em duas camadas.

Os resultados de dureza encontrados neste trabalho coincidem plenamente com os encontrados por Kotecki e Ogborn (1995), que concluíram que a dureza não é o melhor indicador da resistência ao desgaste, e sim a microestrutura. Outros autores reportam resultados similares, Scotti et al (1995), afirmam que um aumento de dureza nem sempre significa um aumento da resistência ao desgaste abrasivo. Fujimura et al (1988), demonstram que com um valor de dureza acima de 600 Hv, a taxa de desgaste não aumenta necessariamente com o valor da dureza Vickers. Considera difícil avaliar a resistência ao desgaste somente pela dureza, e propõe a avaliação através da análise quantitativa da microestrutura do material do revestimento.

Dias & Gomes (2003), após desenvolverem um estudo sobre a resistência ao desgaste abrasivo a baixa tensão de revestimentos duros soldados por arco submerso, concluíram que a dureza não afetou a resistência a abrasão das amostras tanto quanto a microestrutura mostrou ser um fator determinante nesses resultados de desgaste abrasivo.

Rebello et al (1987), concluem que se deve evitar relacionar diretamente dureza com a resistência a abrasão, já que os ensaios de dureza convencionais são quase-estáticos, e diferentes das condições onde a superfície metálica é atingida por partículas abrasivas em velocidades relativamente elevadas.

## 4.4 – DILUIÇÃO

Normalmente, devido ao problema da diluição, os trabalhos realizados para estudo de resistência ao desgaste em revestimentos soldados por processo a arco elétrico utilizam mais de uma camada. Brandim et al, observa que tem que se dar uma atenção especial à diluição, uma vez que ela é causada pela enorme diferença entre as composições químicas do metal de

adição e o metal de base, que geralmente é um aço de baixo carbono e afeta a resistência ao desgaste pelo empobrecimento dos elementos de liga no revestimento final. Para evitar este problema, usualmente, faz-se necessário a deposição de mais de uma camada de revestimento para atenuar o efeito da diluição.

Cappetelli Neto, citado por Martins Filho (1995), ressalta que as composições químicas dos metais de solda para revestimentos anti desgaste começam a se estabilizar a partir da terceira camada. No presente trabalho, fazemos um estudo em amostras revestidas com uma e duas camadas, variando principalmente o parâmetro de corrente elétrica de soldagem no sentido de estabelecer qual a melhor condição em termos de resistência abrasiva, tanto para uma quanto para duas camadas.

Os valores de diluição obtidos nesse trabalho para amostras com uma e duas camadas são apresentados nas tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente.

**Tabela 4.7** - Resultados obtidos de diluição para depósitos com uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>					
CORRENTE (A)	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A
VOLTAGEM (V)	29	29	29	29	29
VEL. MÉDIA (mm/min)	300	300	300	300	300
APORTE TÉRMICO (kJ/mm)	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04
PERDA DE MASSA (g)	0,0369	0,0831	0,1511	0,6569	0,8707
PERDA DE VOLUME (mm <sup>3</sup> )	4,73	10,65	19,73	84,22	111,63
DILUIÇÃO (%)	23	26	35	45	47

**Tabela 4.8** - Resultados obtidos de diluição para duas camadas.

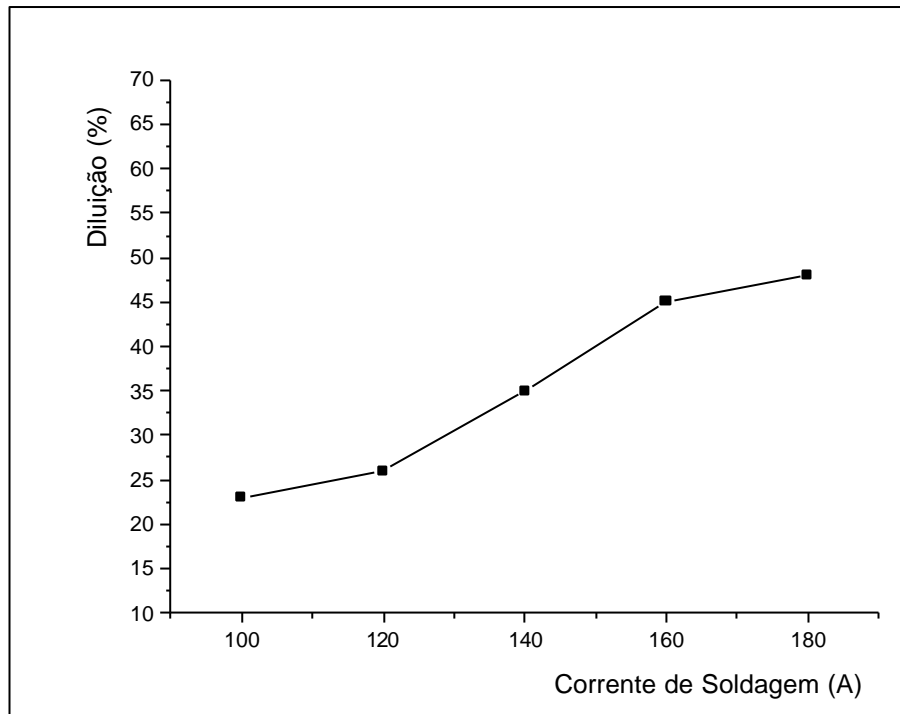
<b>DUAS CAMADAS</b>					
<b>CORRENTE (A)</b>	<b>100 A</b>	<b>120 A</b>	<b>140 A</b>	<b>160 A</b>	<b>180 A</b>
<b>VOLTAGEM (V)</b>	29	29	29	29	29
<b>VEL. MÉDIA</b> (mm/min)	300	300	300	300	300
<b>APORTE</b> <b>TÉRMICO (kJ/mm)</b>	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04
<b>PERDA DE</b> <b>MASSA (g)</b>	0,0726	0,0773	0,0790	0,0928	0,1076
<b>PERDA DE</b> <b>VOLUME (mm<sup>3</sup>)</b>	9,31	9,91	10,13	11,90	13,80
<b>DILUIÇÃO (%)</b>	23	26	35	45	47

Observa-se nas tabelas 4.7 e 4.8, que a maioria dos valores obtidos, encontram-se próximos a 30%. A faixa usual de diluição no processo de soldagem por eletrodo revestido fica entre 10 % a 30 % e essa variação depende das condições de soldagem e das técnicas de soldagem aplicadas durante o processo.

Os resultados verificados nas tabelas, indicam que ocorre um aumento de diluição com o aumento da corrente de soldagem. Todavia esse aumento da taxa de diluição, vai afetar principalmente as amostras com uma camada de revestimento, para as amostras com duas camadas, essa diluição pouco afetou a segunda camada.

#### **4.4.1 – Efeito da corrente de soldagem na diluição**

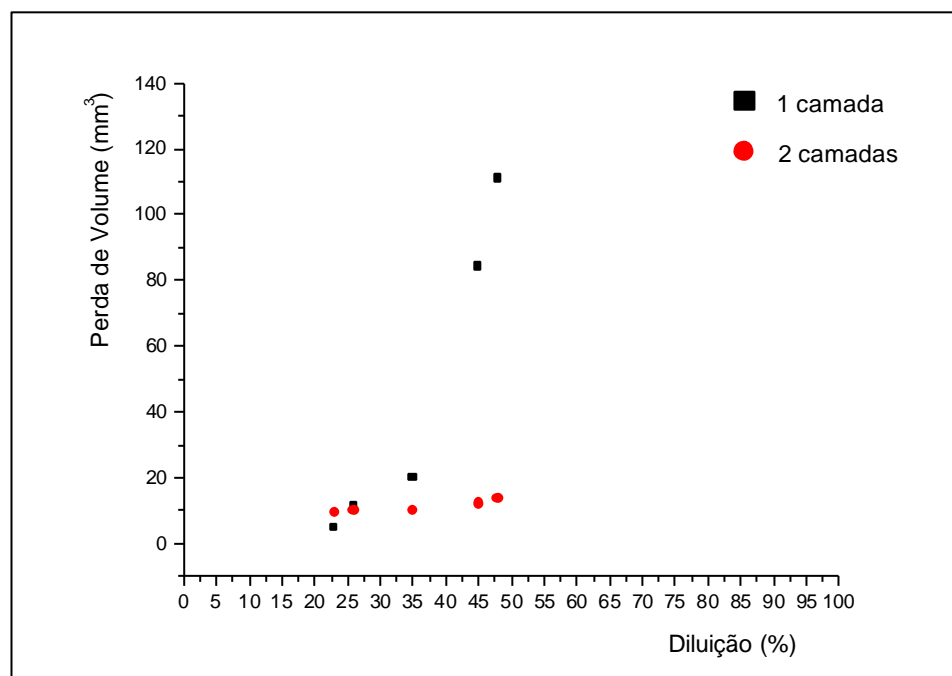
Podemos verificar pelo gráfico da figura 4.11, que existe uma relação entre corrente de soldagem e diluição, ou seja, à medida em que se aumentou a corrente de soldagem, aumentava-se também a taxa de diluição para as amostras de ambas as camadas.



**Figura 4.11** - Relação entre corrente de soldagem e diluição para as amostras com uma e duas camadas.

#### 4.4.2 – Efeito da diluição na resistência ao desgaste.

O comportamento da perda de volume com a diluição é apresentado na figura 4.12.



**Figura 4.12** - Relação entre perda de volume e diluição para uma e duas camadas de revestimento.

De forma geral uma maior diluição tem influência negativa na resistência ao desgaste por abrasão. Pode-se verificar pelo gráfico que para as amostras com uma camada, há uma tendência bem acentuada de aumento de perda de volume com o aumento da diluição, porém para as amostras com duas camadas, nota-se uma tendência muito pequena de perda de volume, porém em ambos os casos, verifica-se uma maior perda de volume nos pontos que registraram maior diluição. Este resultado, é explicado pela relação que existe entre a diluição e a composição química do metal depositado e conseqüentemente com a microestrutura final do revestimento.

A diluição também tem influência sobre a fração volumétrica de carbonetos formado no revestimento. Resultados obtidos por Edwards et al (1983), mostraram que a diluição do metal de base reduz o teor de C e Cr nos revestimentos de ligas de ferro austenítico de alto cromo, diminuindo a fração volumétrica dos carbonetos. No caso de uma diluição baixa, Edwards et al encontraram uma grande fração volumétrica de carbonetos do tipo  $M_3C$ , em ligas a base de carboneto de titânio, carbonetos estes não encontrados para altos valores de diluição.

Costa et al (1994), concluem através de ensaios de desgaste que existe uma forte influência da diluição na resistência à abrasão, uma vez que determina a composição química do revestimento, e conseqüentemente, a fração volumétrica de carbonetos.

## **4.5 – GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA, TRINCAS SUPERFICIAIS E TAXA DE DEPOSIÇÃO.**

### **4.5.1 – Geometria do cordão de solda.**

Para as combinações dos parâmetros de soldagem empregados, as características geométricas dos revestimentos variaram. Quanto ao aspecto visual da camada dos revestimentos, a grande maioria das amostras apresentaram boa aparência, isto é, boa relação largura-altura do cordão. Poucas amostras apresentaram defeitos de porosidade.

Nas tabelas 4.9 e 4.10 são apresentados os valores médios de penetração de solda, largura e altura do cordão dos corpos de prova de uma e duas camadas para correntes de 100 A, 120 A, 140 A, 160 A e 180 A.

**Tabela 4.9** - Geometria dos cordões de solda obtidos para uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>					
<b>CORRENTE (A)</b>	<b>100 A</b>	<b>120 A</b>	<b>140 A</b>	<b>160 A</b>	<b>180 A</b>
<b>PENETRAÇÃO (mm)</b>	0,84	1,2	1,6	2,0	2,4
<b>LARGURA (mm)</b>	9,0	14,0	13,1	14,4	15,0
<b>ALTURA (mm)</b>	2,74	3,6	3,22	2,5	2,2

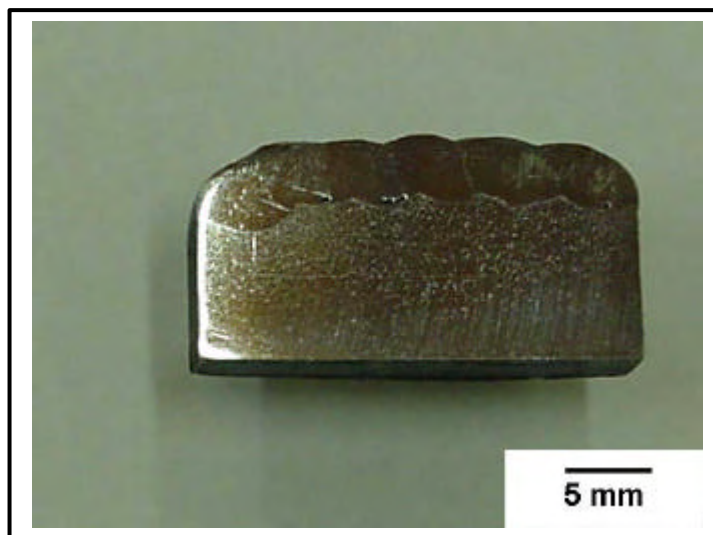
**Tabela 4.10** - Geometria dos cordões de solda obtidos para duas camadas.

<b>DUAS CAMADAS</b>					
<b>CORRENTE (A)</b>	<b>100 A</b>	<b>120 A</b>	<b>140 A</b>	<b>160 A</b>	<b>180 A</b>
<b>PENETRAÇÃO (mm)</b>	1,0	0,9	1,9	2,1	2,2
<b>LARGURA (mm)</b>	9,5	13,0	13,3	14,0	15,0
<b>ALTURA (mm)</b>	3,7	3,9	3,5	2,8	2,6

A geometria dos cordões para os corpos de prova de uma e de duas camadas, comportou-se de forma similar, variando em faixas muito próximas. Todas as dimensões do cordão variaram de acordo com a variação dos parâmetros de soldagem, efeito já esperado. Nota-se que a maior variação da geometria verificada, é a largura do cordão, que está relacionada diretamente com a variação da corrente de soldagem utilizada.

Verifica-se também na amostra de 2 camadas, trincas envolvendo a 2ª camada, possivelmente devido ao alto teor de cromo e carbono nessa camada.

As figuras 4.13 e 4.14 apresentam amostras, revelando a geometria dos cordões de solda em corte transversal para uma e duas camadas.



**Figura 4.13:** Corpo de prova 180A, soldado com 180 amperes com depósito de uma camada



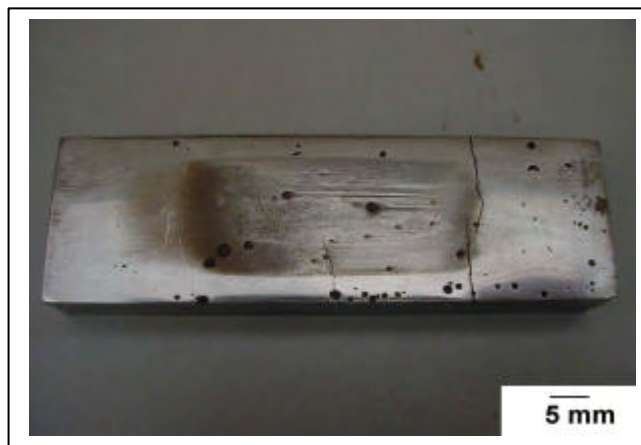
**Figura 4.14:** Corpo de prova 100D, soldado com 100 amperes com depósito de duas camadas.

### 4.5.2 – Trincas superficiais

De forma geral, poucas amostras não apresentaram trincas na superfície do revestimento, conforme mostra a figura 4.15 porém, a grande maioria apresentou trincas superficiais conforme figura 4.16.



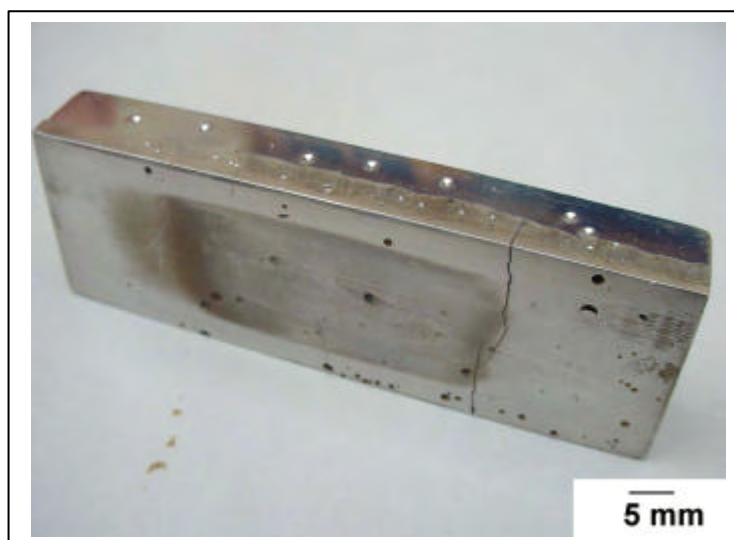
**Figura 4.15** - Amostra revestida com uma camada com corrente de soldagem de 180 A, após ter sido desgastada. Corpo de prova 180A.



**Figura 4.16** - Amostra revestida com duas camadas com corrente de soldagem de 180A, após ter sido desgastada. Corpo de prova 180D.

As amostras soldadas com valores elevados de aportes térmicos, e correntes de soldagem também elevadas, de 160 A e 180 A, apresentaram poucas trincas, ou nenhuma, principalmente as amostras com uma camada de revestimento. Essas amostras, apresentaram maior valor de desgaste.

Foi verificado que as amostras revestidas a uma corrente de 100 A apresentaram resultado de perda de volume relativamente baixo, aumentando um pouco para as correntes de 120 A e 140 A. É importante observar que as amostras que apresentaram melhor resistência ao desgastes, possuíam trincas superficiais tanto na primeira como na segunda camada de revestimento, sendo que na segunda camada as trincas foram ainda maiores. A figura 4.17 apresenta a amostra 160D com trincas, envolvendo a primeira e a segunda camada de revestimento.



**Figura 4.17** - Amostra com trincas no revestimento envolvendo a primeira e a segunda camada. Amostra 160D.

Este resultado pode estar relacionado com a composição química obtida na segunda camada, que possui maiores teores de carbono e cromo. A presença de trincas superficiais tem sido estudado por vários pesquisadores, mostrando resultados que muitas vezes não coincidem.

Kotecki (1992) explica que no caso de materiais muito duros, tais como carbonetos de cromo, não devem ser aplicados mais que duas camadas para prevenir excessivo trincamento. Devido a isto, os carbonetos de cromo estão projetados para trincar como uma forma de alívio de tensões, e recomenda-se que a primeira camada seja aplicada com uma velocidade de soldagem alta para conseguir uma grande quantidade de trincas pequenas ao invés de poucas mas de tamanho maior.

Albuquerque et al (1994) pesquisaram a otimização dos parâmetros de soldagem para evitar trincas nos revestimentos, e chegaram a conclusão de que quase todas as amostras que não apresentaram trincas sofreram pré-aquecimento e que quanto maior o pré-aquecimento, até o limite empregado no trabalho, menor quantidade de trincas apareceriam. Por outro lado, observaram mais trincas na segunda camada do que na primeira, como teoricamente esperado.

Noble (1986) relata que na soldagem de revestimento da classe Fe-Cr-C de alto Cr, todos os depósitos, mostraram trincamento extensivo, isto é, carreiras de trincas ao longo e através do cordão de solda de maneira caótica. Este aspecto não é considerado uma indicação de técnicas de soldagem pobre, já que os depósitos de solda das ligas dessa classe, são notoriamente propensas a trincas durante o resfriamento. Ressalta que a presença de trincas, em amostras submetidas a ensaios de desgaste abrasivo, provoca a geração de resultados dificilmente reproduzíveis, devido ao ingresso do abrasivo na trinca, levando a falsas medidas de perda de volume.

Martins Filho (1995) realizou ensaios em revestimentos da classe Fe-C-Cr de baixa liga obtendo trincas superficiais, e atribuiu essas trincas à baixa ductilidade da fase martensítica e à presença de fileira de carbonetos de cromo nos contornos de grão da austenita, indicando que durante o resfriamento do metal de solda as tensões de contração surgidas e a existência da interconexão dos carbonetos de cromo promovem um trincamento intergranular da fase martensítica. Concluiu que as microestruturas com elevado teor de martensita e isenta de trincas demonstraram ser mais resistentes ao desgaste do que microestruturas com menores quantidades de martensita.

No presente trabalho as trincas superficiais que apareceram nas amostras ensaiadas são típicas de resfriamento. Essas trincas surgem para reduzir as tensões residuais devido a contração durante o resfriamento, sendo que essas são afetadas pela composição química do revestimento, nesse caso, revestimentos da classe Fe-C-Cr. As trincas surgidas no revestimento não mostraram influência sobre a perda de volume das amostras ensaiadas já que os melhores resultados de resistência ao desgaste de abrasão a baixa tensão, tanto para as

amostras com uma camada, como para as amostras com duas camadas, foram verificados nas amostras que apresentaram trincas superficiais.

Com base nesses resultados, conclui-se que não existe uma relação comprovada de aumento de perda de volume em presença de trincas superficiais.

### 4.5.3 – Taxa de Deposição

A taxa de deposição demonstra ser dependente da corrente de soldagem que por sua vez está relacionada com a velocidade de soldagem. Nas tabelas 4.11 e 4.12, verifica-se os valores de taxa deposição obtidos durante os ensaios, para uma e duas camadas. Não houve variação da taxa de deposição para uma e duas camadas, uma vez que as velocidades de soldagem não se alteraram.

Para todas as amostras, verificou-se uma tendência de maior taxa de deposição para as combinações com altas amperagens e baixas velocidades de soldagem.

**Tabela 4.11** - Valores de taxa de deposição obtidos para revestimento de uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>					
<b>CORRENTE (A)</b>	<b>100 A</b>	<b>120 A</b>	<b>140 A</b>	<b>160 A</b>	<b>180 A</b>
<b>VOLTAGEM (V)</b>	29	29	29	29	29
<b>VEL. MÉDIA DE SOLDAGEM</b>	300	300	300	300	300
<b>(mm/min)</b>					
<b>TAXA DE DEPOSIÇÃO</b>	1,85	2,31	2,93	3,27	3,85
<b>(kg/h)</b>					

**Tabela 4.12** - Valores de taxa de deposição obtidos para revestimento de duas camadas.

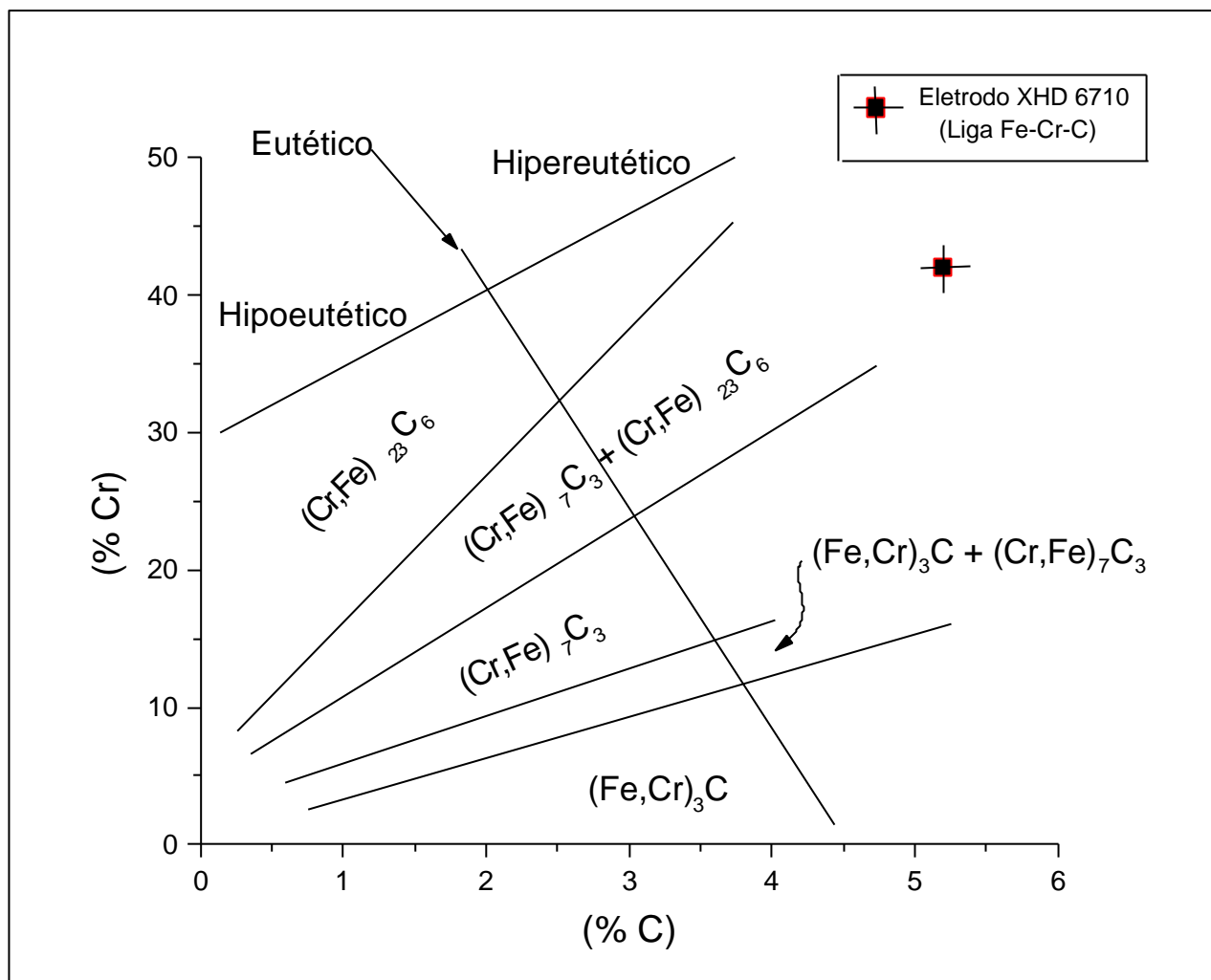
<b>DUAS CAMADAS</b>					
<b>CORRENTE (A)</b>	<b>100 A</b>	<b>120 A</b>	<b>140 A</b>	<b>160 A</b>	<b>180 A</b>
<b>VOLTAGEM (V)</b>	29	29	29	29	29
<b>VEL. MÉDIA DE SOLDAGEM (mm/min)</b>	300	300	300	300	300
<b>TAXA DE DEPOSIÇÃO (kg/h)</b>	1,85	2,31	2,93	3,27	3,85

## 4.6 – ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural foi realizada da seguinte forma:

Para cada corrente de soldagem (100 A, 120 A, 140 A, 160 A e 180 A), foram revestidos três corpos de prova com uma e com duas camadas. Em cada grupo de três corpos, escolheu-se um corpo que apresentava o revestimento com melhor aparência, totalizando assim dez corpos selecionados, ou seja, cinco corpos com uma camada e cinco corpos com duas camadas. Na sequência, esses corpos escolhidos, foram seccionados, gerando assim dez amostras e então, cada uma dessas amostras foi submetida à análise microestrutural.

As ligas estudadas foram incluídas no diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr-C, apresentadas na figura 4.18.



**Figura 4.18** - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Fe-Cr-C (Fujimura et al,1988).

#### 4.6.1 – Microestrutura para o os corpos de prova com depósito em uma camada.

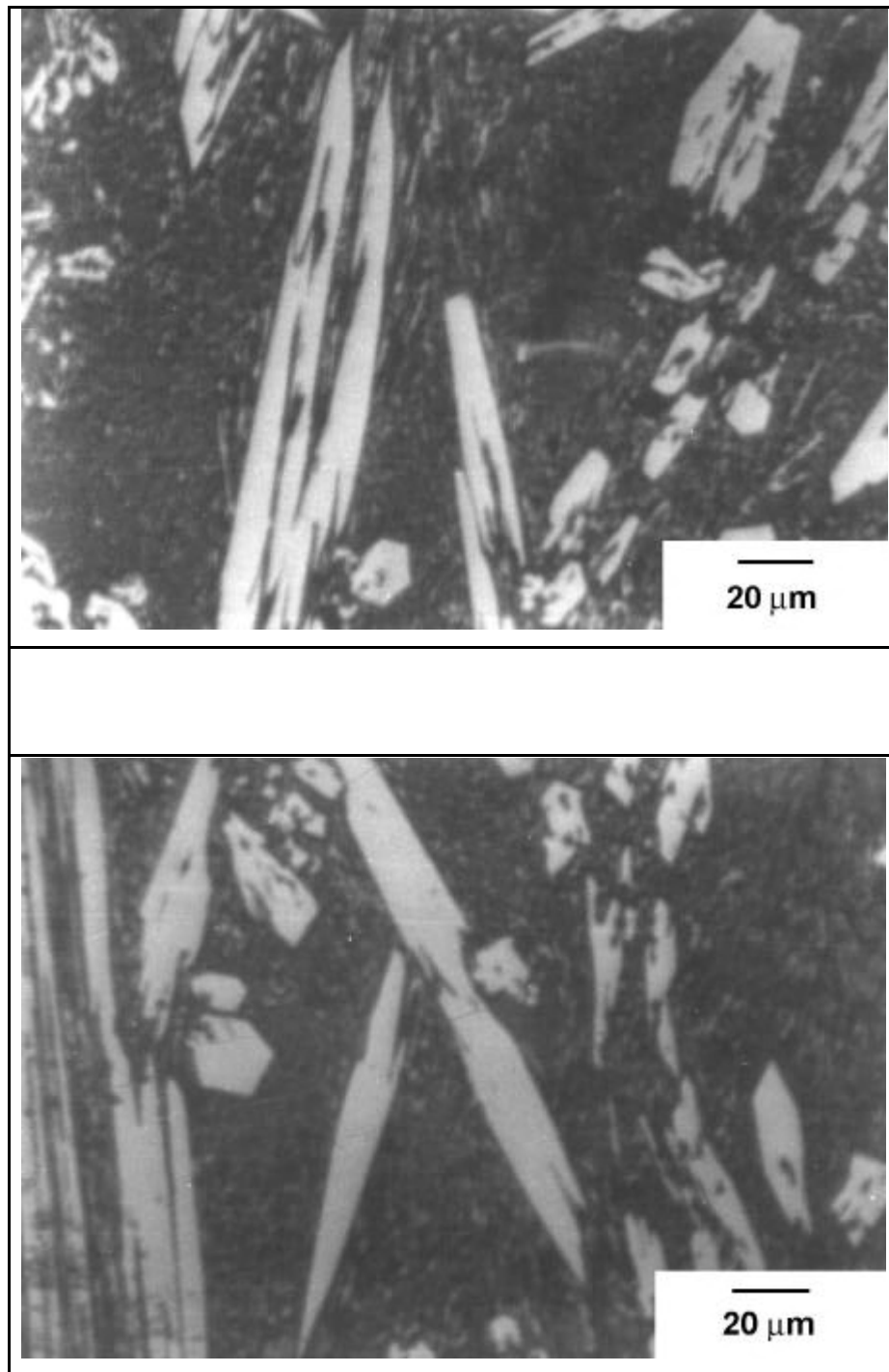
Para os corpos de prova com revestimento em uma camada foram analisadas as amostras 100A, 120A, 140A, 160A e 180A, conforme microestruturas apresentadas nas figuras 4.19, figura 4.20, figura 4.21, figura 4.22 e figura 4.23, respectivamente.

Com relação as amostras 100A e 120A, concluiu-se que estas apresentaram uma microestrutura hipereutética com base na composição química do eletrodo (42 % Cr e 5,3 % C). Pela análise micrográfica, verificou-se na amostra 100A, a presença de carbonetos primários muito grandes do tipo  $M_7C_3$  precipitados na matriz eutética. Na amostra 120A, verificou-se uma concentração de carbonetos primários, além de uma grande fração volumétrica de carbonetos secundários. Estas amostras apresentaram baixa perda de volume e alta dureza. Segundo Fiore et al, a fração volumétrica de carbonetos é um dos mais importantes parâmetros microestruturais que afetam a resistência ao desgaste abrasivo. Embora, segundo o autor, apesar do alto nível de dureza dos carbonetos de cromo do tipo  $M_7C_3$ , contribuírem para a resistência ao desgaste, os mesmos são frágeis, e o modo pelo qual estão presos na matriz pode desempenhar um papel importante na ocorrência ou não de trincas durante a abrasão.

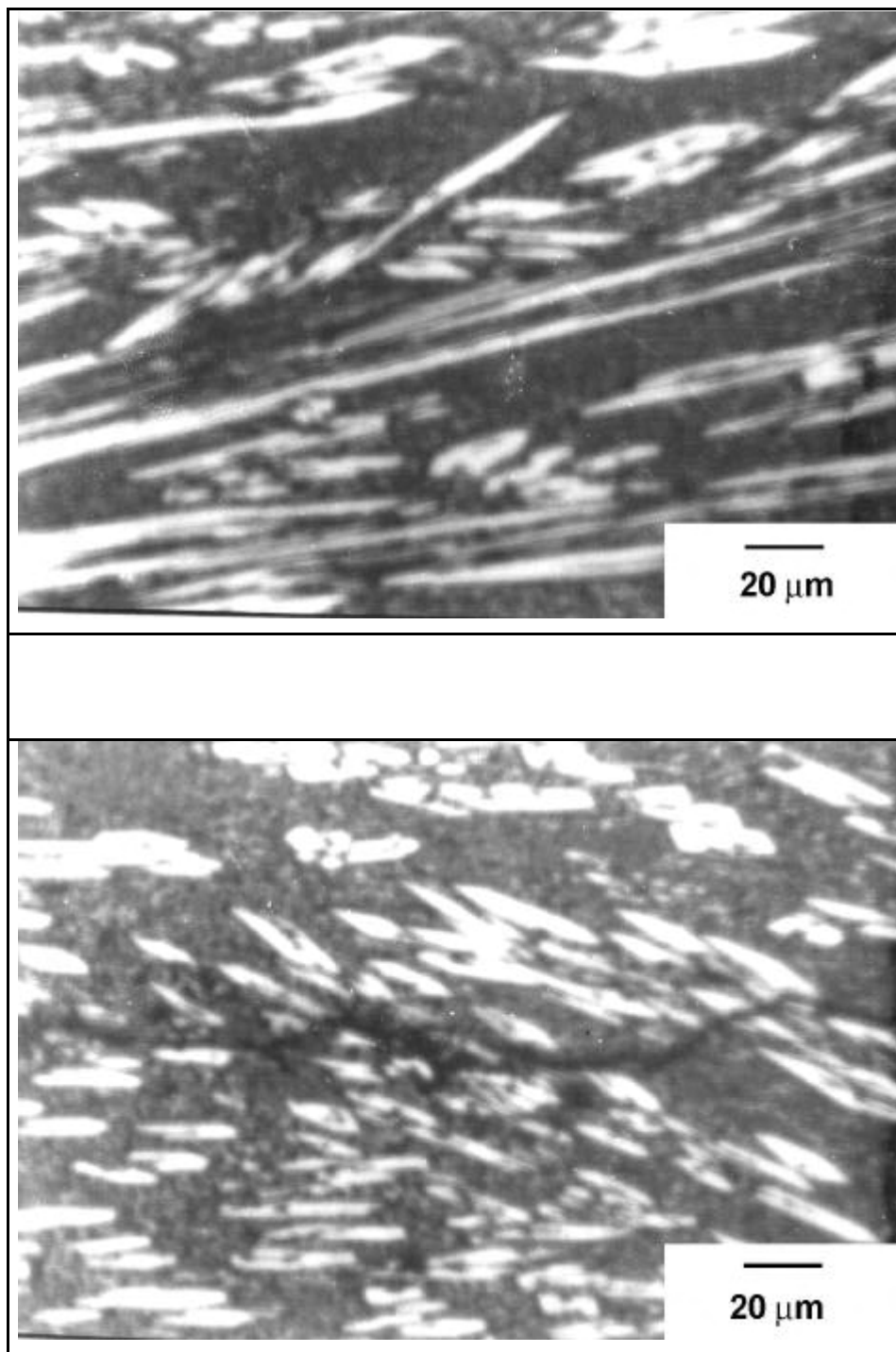
Com relação as amostras revestidas a 160A e 180A, constatou-se uma alta taxa de diluição com o metal de base e baixa dureza, sugerindo a formação de uma estrutura hipoeutética composta de carbonetos secundários numa matriz eutética de austenita.

As amostras 160A e 180A, apresentaram as maiores perdas de volume. Para a amostra 160A, verificou-se pequena fração volumétrica de carbonetos secundários e a presença de poucos carbonetos primários bem dispersos na matriz. Quanto a amostra 180A, verificou-se uma fração volumétrica muito pequena de carbonetos secundários dispersos na matriz.

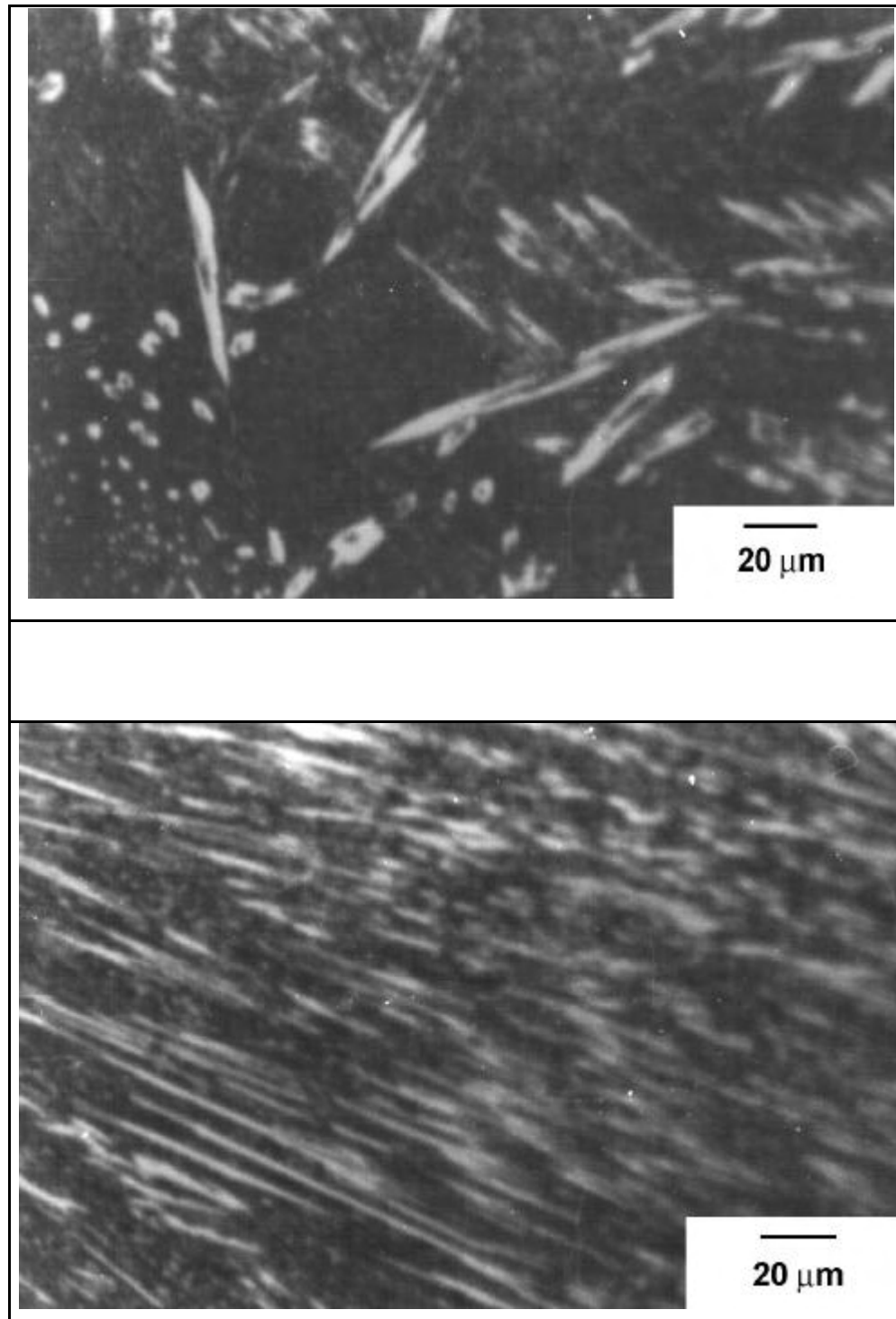
A amostra 140A, apresentou uma microestrutura intermediária, quanto ao tamanho e fração volumétrica dos carbonetos. Constatou-se a presença de uma fração volumétrica muito grande de carbonetos secundários e pequena quantidade de carbonetos primários dispersos na matriz. Sua perda de volume, encontra-se também num valor intermediário.



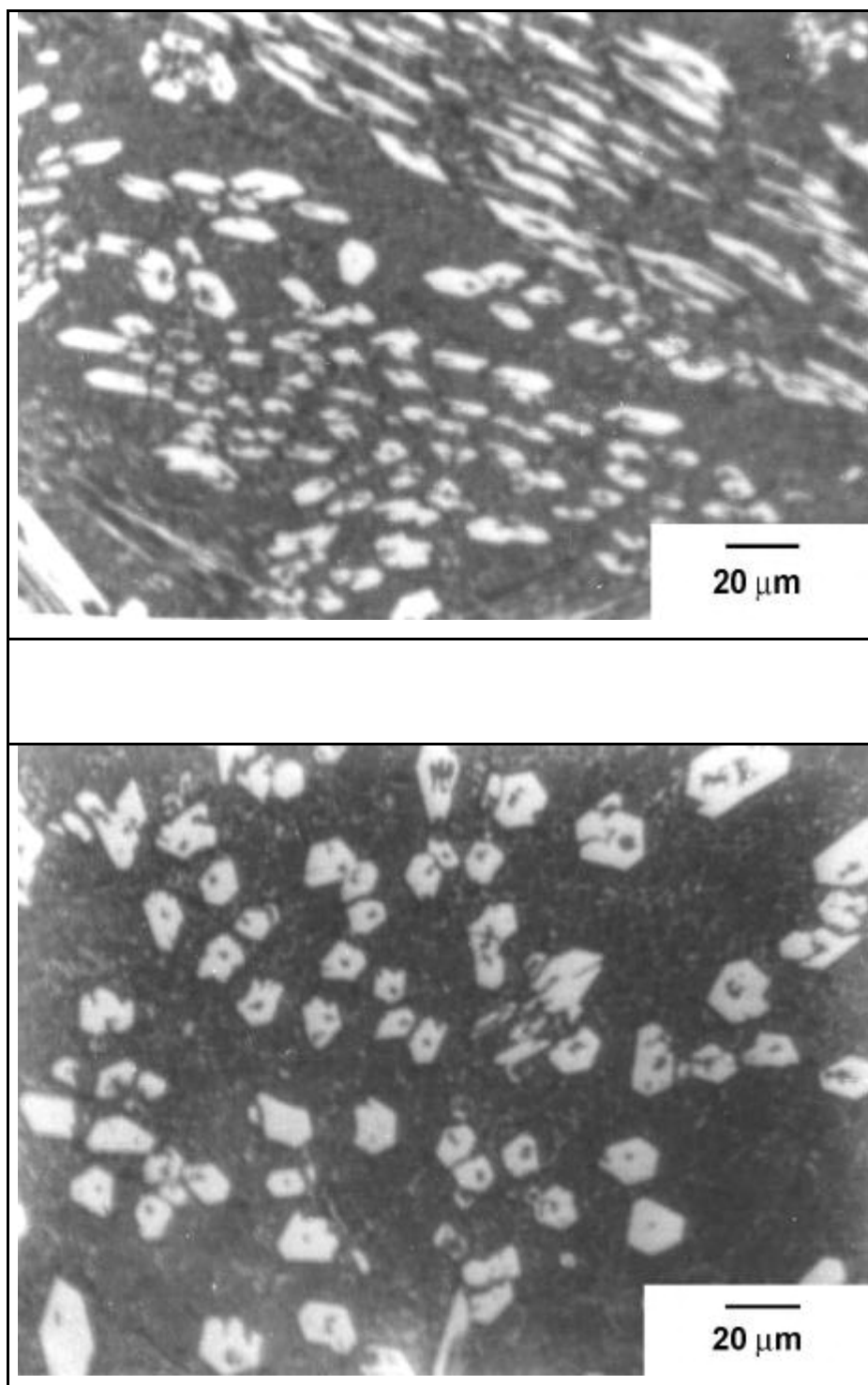
**Figura 4.19** - Microestrutura do metal depositado da amostra 100A. Aumento 250 X.



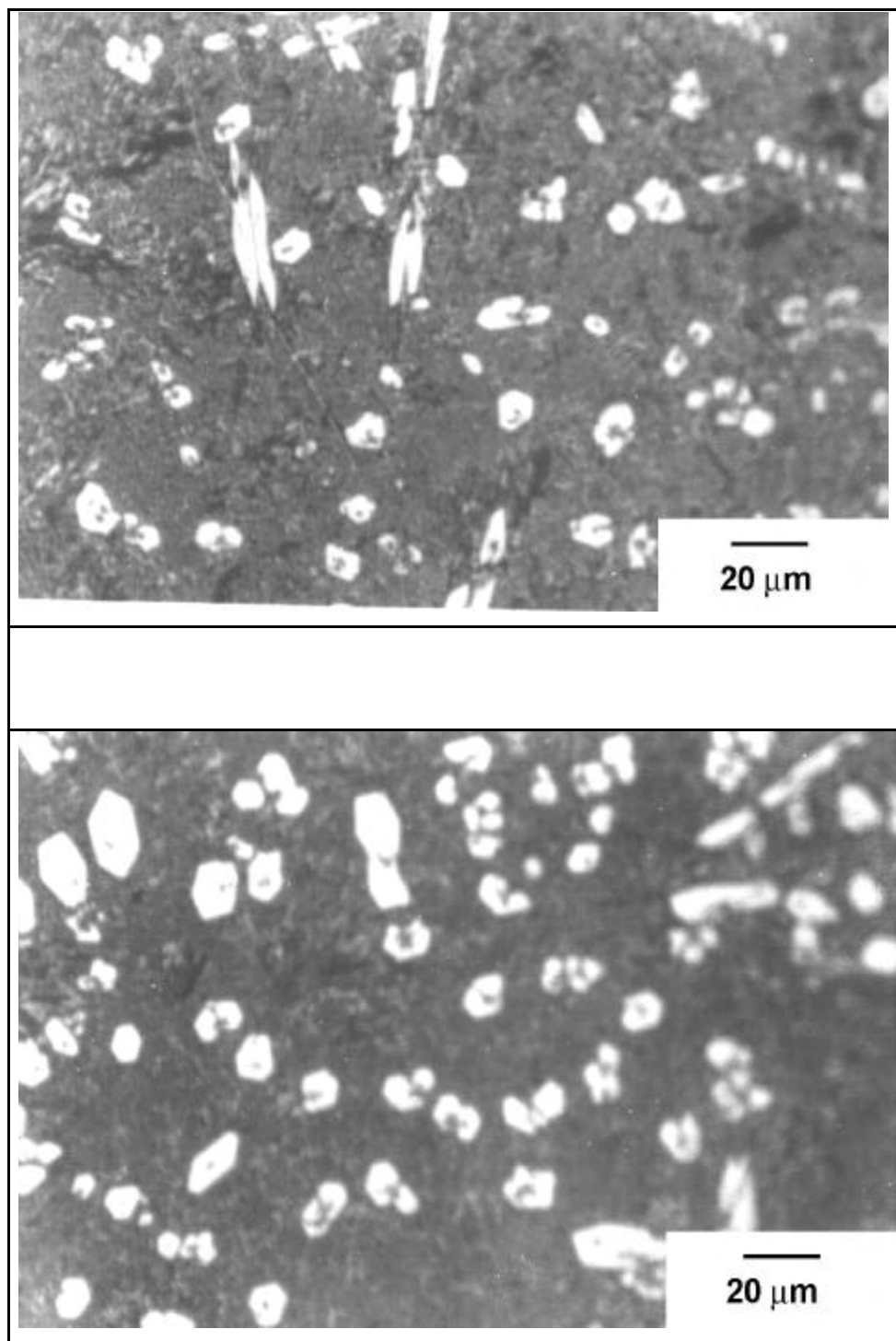
**Figura 4.20** - Microestrutura do metal depositado da amostra 120A. Aumento 250 X.



**Figura 4.21** - Microestrutura do metal depositado da amostra 140A. Aumento 250 X.

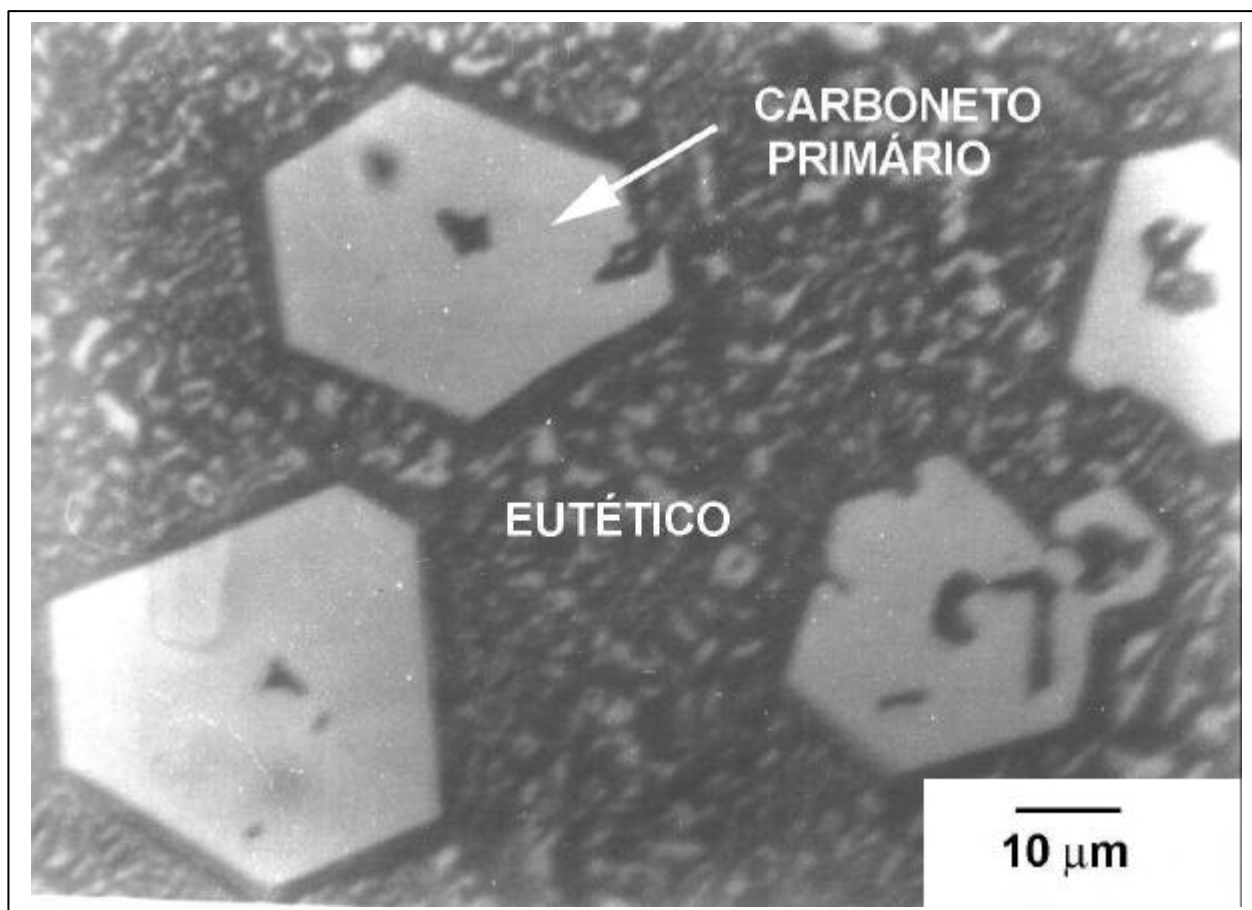


**Figura 4.22** - Microestrutura do metal depositado da amostra 160A. Aumento 250 X.



**Figura 4.23** - Microestrutura do metal depositado da amostra 180A. Aumento 250 X.

A figura 4.24, mostra uma microestrutura representativa da amostra 100 A, com aumento de 600 X, onde pode-se observar a presença de carbonetos primários de forma hexagonal em uma matriz rica em carbonetos eutéticos. Microestrutura semelhante foi descrita por Svensson et al (1988), para uma liga Fe - 34Cr - 4,5C.



**Figura 4.24** – Microestrutura representativa da amostra 100 A, com aumento de 600 X.

## **4.6.2 – Microestrutura para o os corpos de prova com depósito em duas camadas.**

Para os corpos de prova com revestimento em duas camadas foram analisadas as amostras 100D, 120D, 140D, 160D e 180D, conforme microestruturas apresentadas nas figuras 4.25, figura 4.26, figura 4.27, figura 4.28 e figura 4.29, respectivamente.

Para os revestimentos realizados com duas camadas, não foi constatado grande variação de perda de volume entre as amostras. Essas amostras, apresentaram na segunda camada uma microestrutura hipereutética, não havendo grandes variações de dureza entre elas e a variação de perda de volume foi muito pequena. Concluiu-se que essas amostras apresentaram uma estrutura hipereutética, devido a baixíssima taxa de diluição com o metal de base, e por isso, considerou-se a estrutura semelhante a do eletrodo.

Apesar dessas amostras apresentarem uma grande quantidade de carbonetos primários de cromo, favorecendo uma perda de volume menor, elas também apresentaram uma pequena variação na microestrutura.

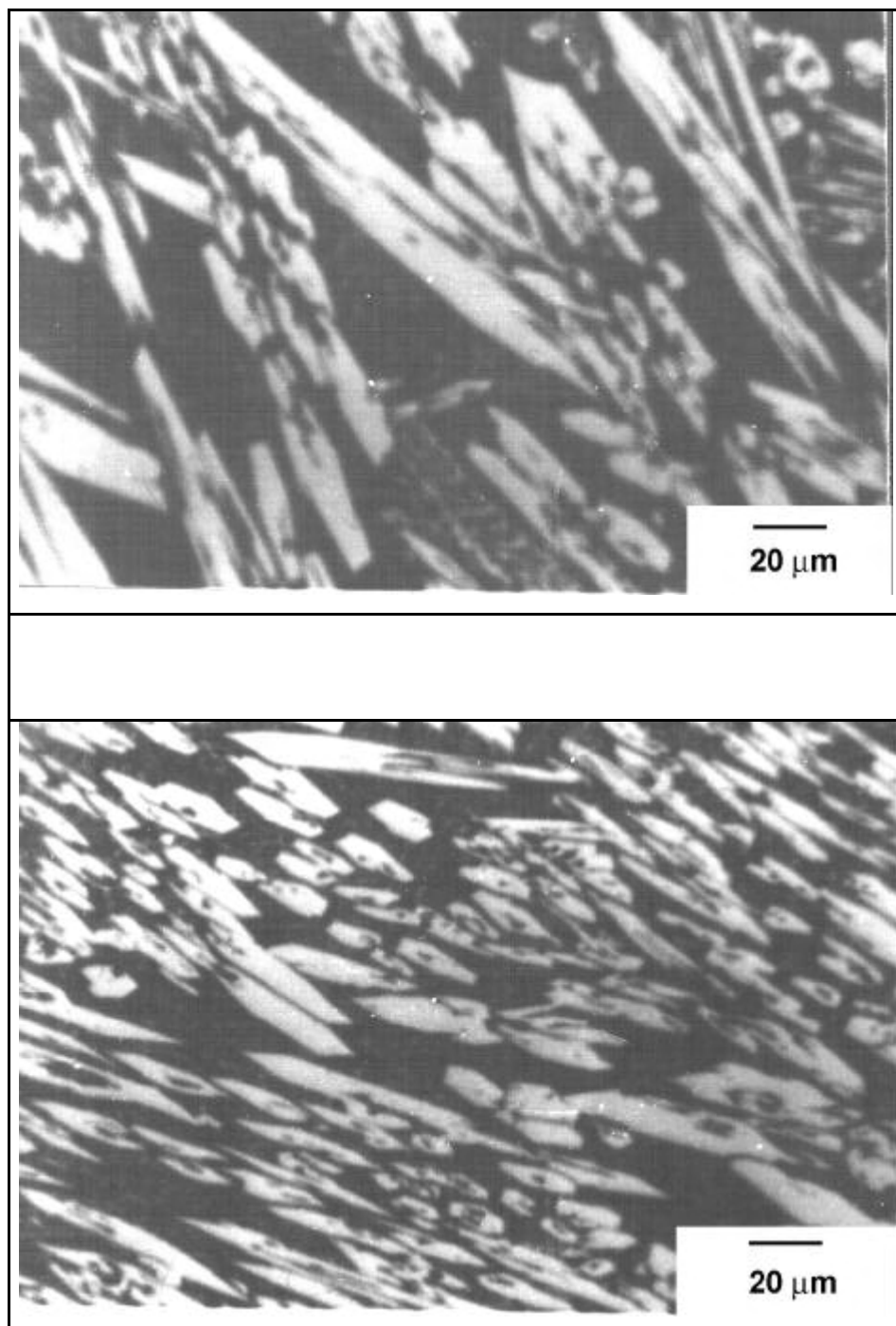
Para as amostras 100D e 120D, verificou-se uma fração volumétrica grande de carbonetos primários, além de uma fração volumétrica muito grande de carbonetos secundários precipitados na matriz.

A amostra 140D, apresenta uma microestrutura composta com uma grande concentração de carbonetos secundários e poucos carbonetos primários de tamanhos grandes.

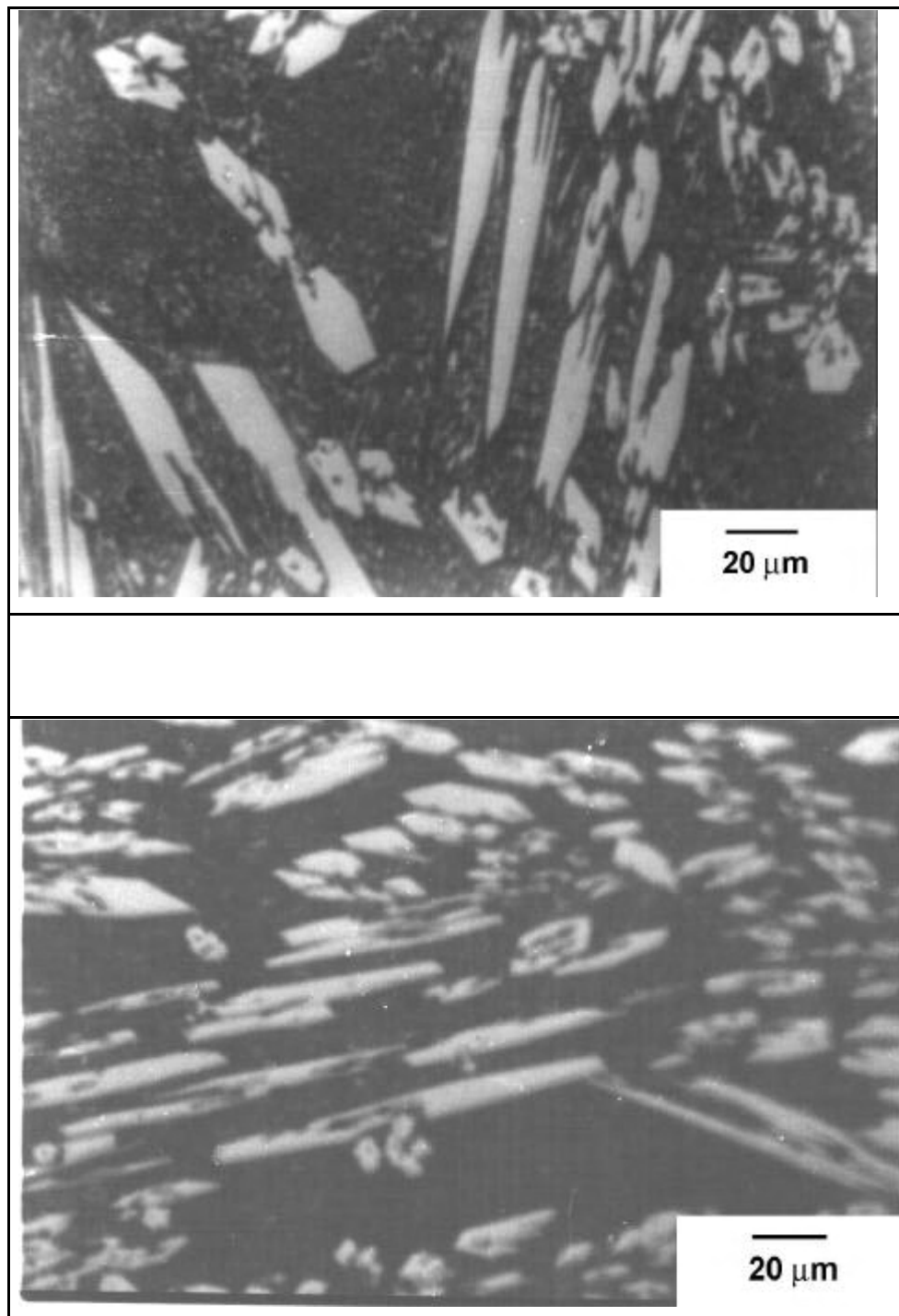
A amostra 160D apresenta uma concentração de carbonetos primários não muito grandes e razoável concentração de carbonetos secundários.

Para a amostra 180D, verificou-se a presença de carbonetos primários dispersos na matriz, além de uma certa concentração de carbonetos secundários.

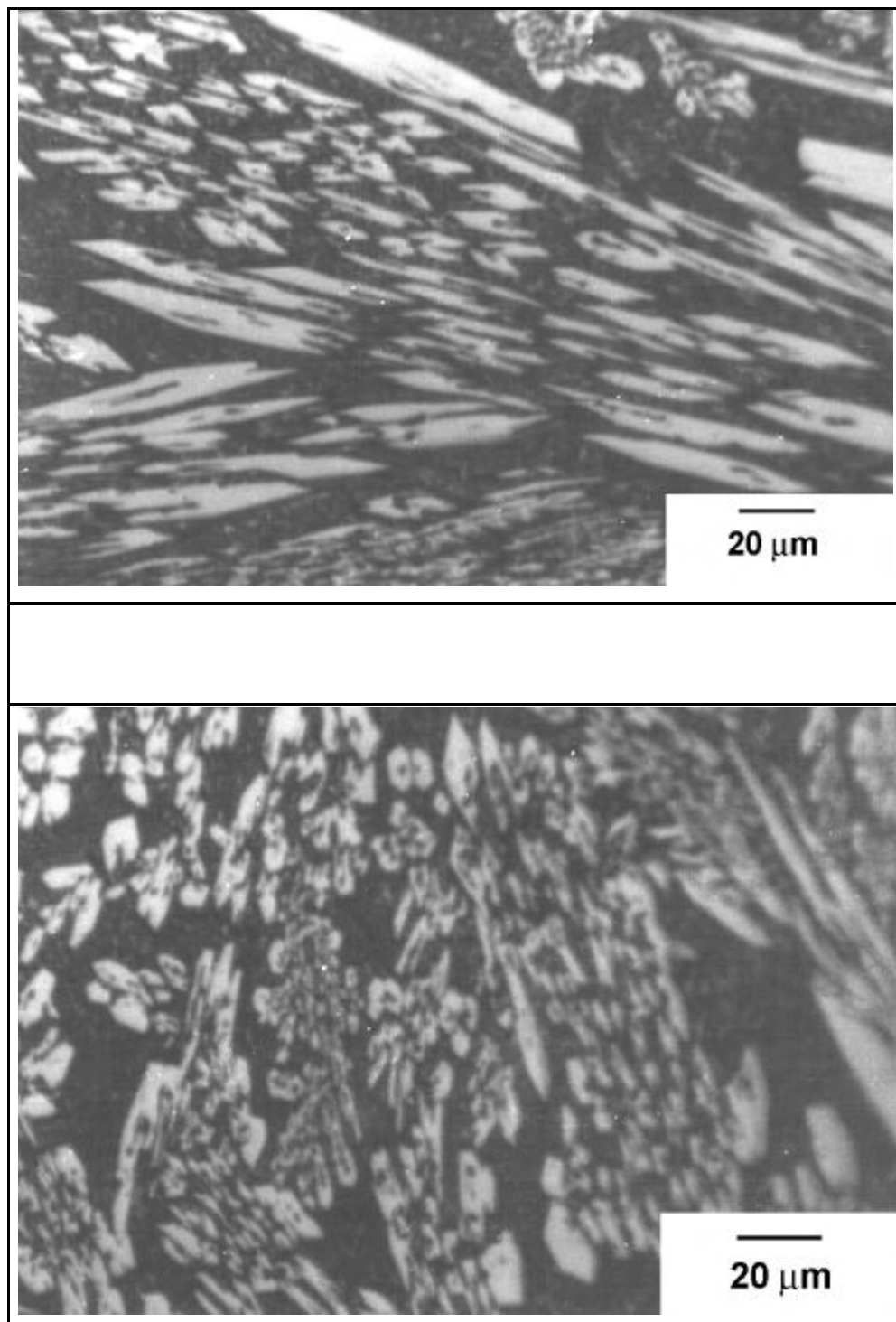
Segundo Fiore (1983), os carbonetos grandes podem trincar e pedaços grandes podem destacar-se, expondo a matriz a uma maior taxa de desgaste. Logo os carbonetos grandes podem não aumentar a resistência à abrasão da liga, embora resistam mais ao desgaste que a matriz, até o ponto em que trincam.



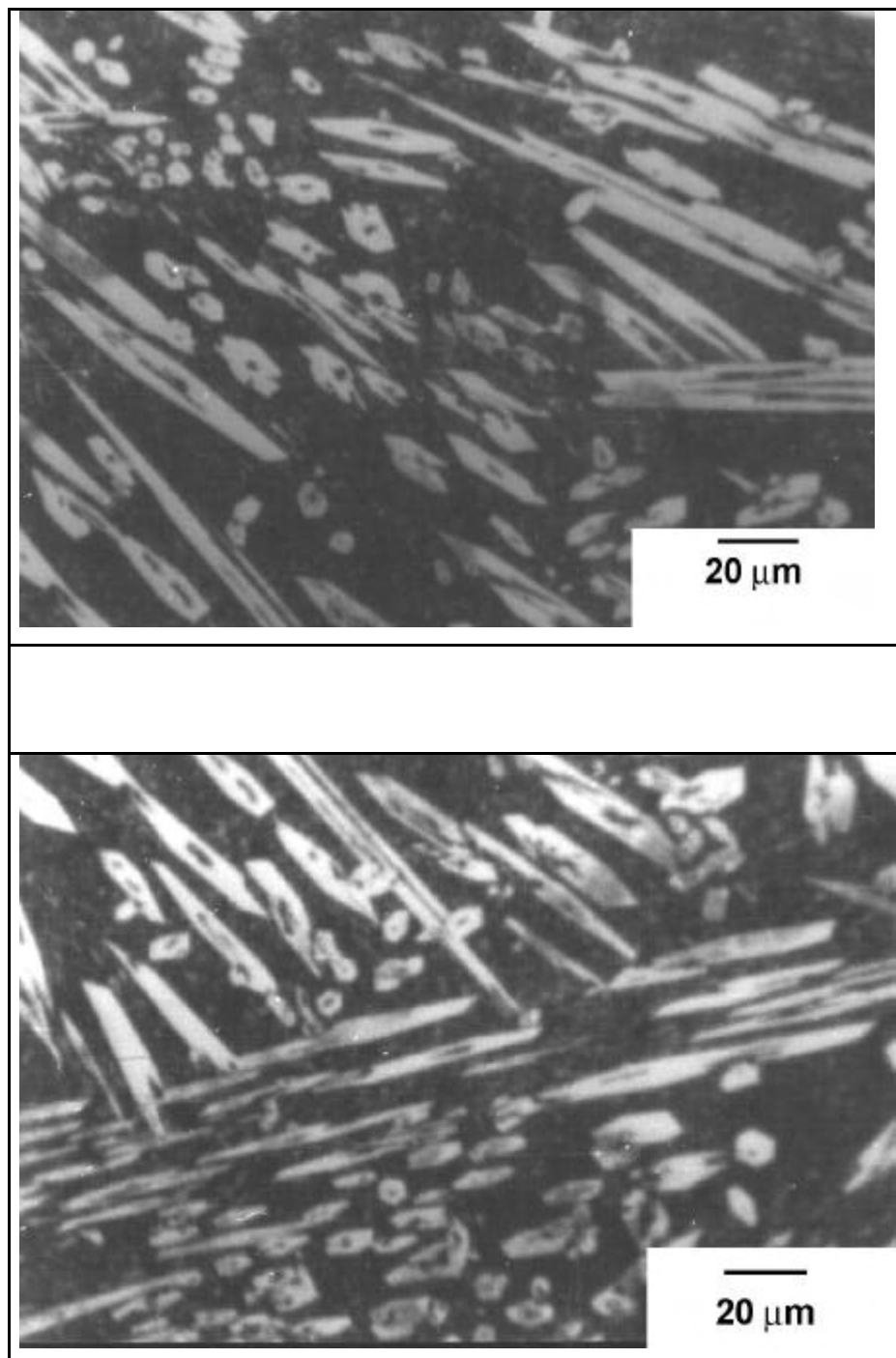
**Figura 4.25** - Microestrutura do metal depositado da amostra 100D. Aumento 250 X.



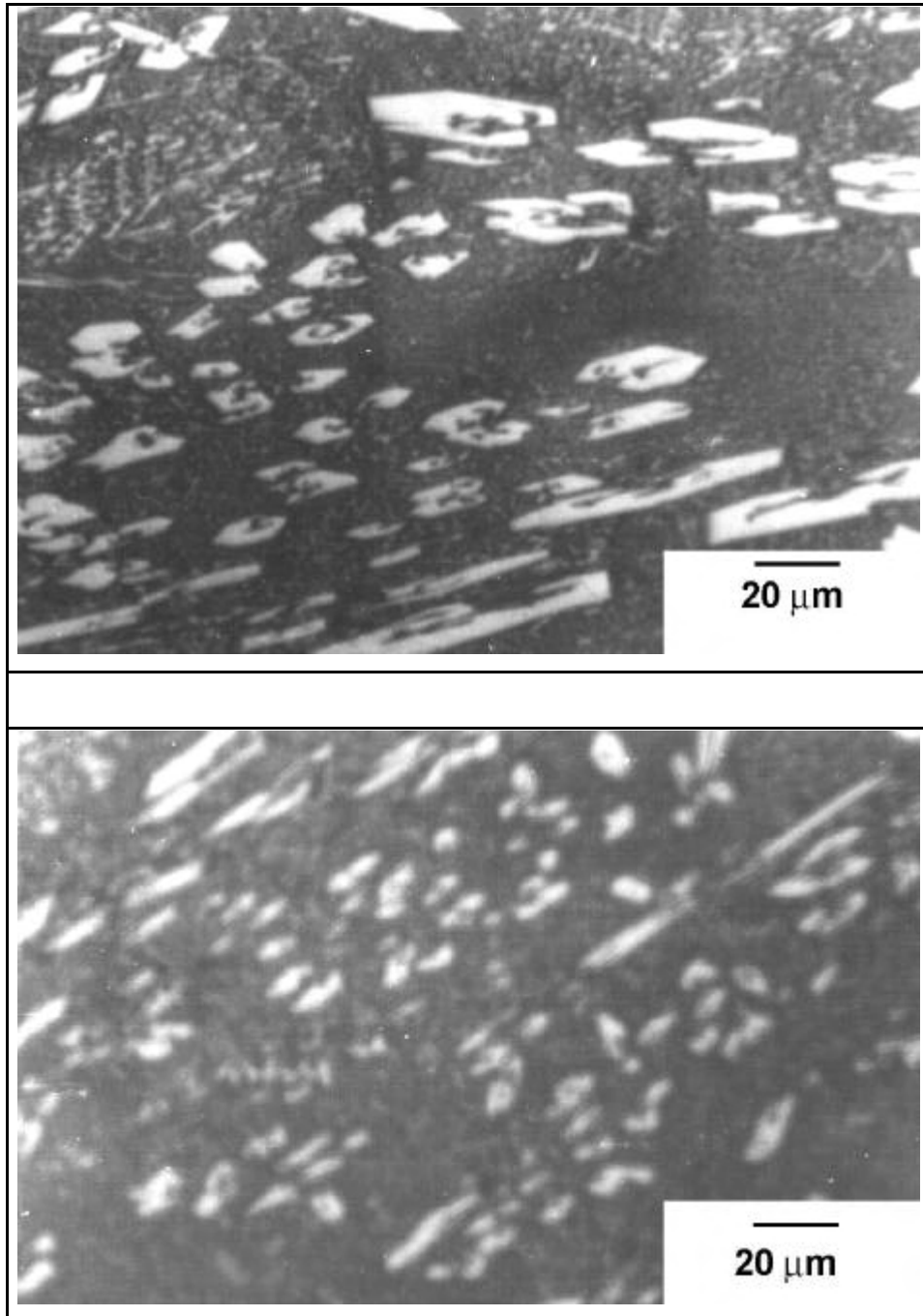
**Figura 4.26** - Microestrutura do metal depositado da amostra 120 D. Aumento 250 X.



**Figura 4.27** - Microestrutura do metal depositado da amostra 140D. Aumento 250 X.



**Figura 4.28** - Microestrutura do metal depositado da amostra 160D. Aumento 250 X.



**Figura 4.29** - Microestrutura do metal depositado da amostra 180D. Aumento 250 X.

### 4.6.3 – Microdureza

Foram realizadas medidas de microdureza para as amostras de melhor desempenho, para uma e duas camadas, conforme resultados apresentados nas tabelas 4.13 e 4.14, respectivamente.

**Tabela 4.13** - Valores de microdurezas Vickers das amostras revestidas com uma camada.

<b>UMA CAMADA</b>											
		<b>100 A</b>		<b>120 A</b>		<b>140 A</b>		<b>160 A</b>		<b>180 A</b>	
		CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO	
<b>HV</b>	MÁX.	2167	MÁX.	2167	MÁX.	3027	MÁX.	3027	MÁX.	2544	
	MÍN.	1628	MÍN.	1869	MÍN.	1869	MÍN.	1430	MÍN.	1869	
<b>MÉDIA</b>		<b>1888</b>		<b>2015</b>		<b>2354</b>		<b>2028</b>		<b>2193</b>	
		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ	
<b>HV</b>	MÁX.	586	MÁX.	636	MÁX.	916	MÁX.	317	MÁX.	467	
	MÍN.	357	MÍN.	407	MÍN.	502	MÍN.	283	MÍN.	229	
<b>MÉDIA</b>		<b>482</b>		<b>528</b>		<b>685</b>		<b>306</b>		<b>321</b>	

**Tabela 4.14** - Valores de microdurezas das amostras revestidas com duas camadas.

<b>DUAS CAMADAS</b>										
	<b>100 A</b>		<b>120 A</b>		<b>140 A</b>		<b>160 A</b>		<b>180 A</b>	
	CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO		CARBONETO	
<b>HV</b>	MÁX.	2167	MÁX.	2544	MÁX.	3027	MÁX.	3027	MÁX.	2544
	MÍN.	1628	MÍN.	1869	MÍN.	1628	MÍN.	1869	MÍN.	1869
<b>MÉDIA</b>	<b>1888</b>		<b>2193</b>		<b>2274</b>		<b>2480</b>		<b>2193</b>	
	MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ		MATRIZ	
<b>HV</b>	MÁX.	586	MÁX.	692	MÁX.	636	MÁX.	916	MÁX.	1015
	MÍN.	467	MÍN.	502	MÍN.	636	MÍN.	502	MÍN.	757
<b>MÉDIA</b>	<b>518</b>		<b>629</b>		<b>636</b>		<b>750</b>		<b>843</b>	

#### 4.6.3.1 – Análise da microdureza para as amostras com uma camada de revestimento.

Observou-se que, para a primeira camada a diferença de microdureza existente entre as amostras, é influenciada pela composição química do eletrodo e pela taxa de diluição com o metal de base que variou de acordo com a corrente estabelecida. O valor da microdureza da matriz eutética com carbonetos secundários é superior ao valor da matriz eutética como esperado, mostrando então uma menor perda de volume para as amostras com maior quantidade de carbonetos de cromo no eutético.

Verificou-se que para as amostras que foram revestidas com correntes de soldagem mais altas (160 A e 180 A), os valores de microdureza estão dentro da faixa que Noble(1986)

reporta, de 523 à 768 HV para a fase austenita . Para a amostras que foram revestidas com correntes de soldagem mais baixas (100 A, 120 A e 140 A), apresentou valores superiores aos encontrados na literatura, provavelmente devido ao seu teor de carbono e cromo, mais elevado devido à baixa diluição com o metal de base.

#### **4.6.3.2 – Análise da microdureza para as amostras com duas camadas de revestimento.**

Para a segunda camada ocorreram mudanças significativas, e a microdureza verificada das amostras foi bem maior que para uma camada, devido a baixa diluição da segunda camada e ao aumento do teor de C e Cr no revestimento, fator este que provocou uma maior formação de carbonetos de cromo na matriz. Os valores encontrados são superiores aos reportados por outros pesquisadores. Em todas as amostras notou-se a presença de carbonetos primários de cromo com alta dureza.

Para o eutético, a microdureza mostra um relação mais clara com a resistência ao desgaste por abrasão a baixa tensão, coincidindo os menores valores de perda de volume com os maiores valores de microdureza.

# Conclusões

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir o seguinte:

- Os parâmetros de soldagem para o eletrodo revestido tem uma significativa influência na resistência à abrasão a baixa tensão na liga estudada.
- Os melhores resultados experimentais de resistência ao desgaste à abrasão a baixa tensão para os revestimentos com uma e duas camadas, soldados com Eletrodo XHD 6710 – Eutectic&Castolin, foram obtidos com as combinações de corrente de soldagem de 100 A, voltagem de soldagem de 29 V e velocidade de soldagem de 300 mm/min.
- Segundo os resultados do planejamento experimental utilizado, as combinações consideradas ótimas dentro da faixa estudada para soldagem dos revestimentos com uma e duas camadas são: corrente de soldagem entre 100 A a 120 A, voltagem de soldagem de 29 V e velocidade de soldagem de 300 mm/min.
- A dureza do revestimento não apresenta uma relação direta com a resistência à abrasão a baixa tensão, não sendo o melhor indicador de perda de volume.
- A diluição do metal de base provoca diferenças nas microestruturas dos revestimentos.
- Das microestruturas obtidas, a de maior resistência à abrasão foi o carbono primário numa matriz eutética de carbonetos mais austenita.

## 5.1 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudo sobre a resistência ao desgaste em condições secas a alta tensão, de revestimento duro soldado por eletrodo revestido tipo Fe-Cr-C, em uma e duas camadas, variando os parâmetros de soldagem: corrente, velocidade e voltagem.
- Estudo sobre a resistência ao desgaste em condições molhadas a baixa e a alta tensão, de revestimento duro soldado por eletrodo revestido tipo Fe-Cr-C, em uma e duas camadas, variando os parâmetros de soldagem: corrente, velocidade e voltagem.
- Um estudo sobre a influência de uma terceira camada de revestimento enfatizando o que foi estudado no presente trabalho.

## Referências Bibliográficas

---

ASTM – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. **ASTM G 65-91** – p. 231-243, 1991.

BRANDIM, A. DE SÁ & ALCÂNTARA, N. GUEDES DE & HERNANDEZ, O. J. SARRIA& PARANHOS, R. P. DA ROCHA – Resistência ao Desgaste por abrasão em metal de solda do tipo Fe-C-Cr, obtidos por arco submerso. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação** – 203.

COSTA, J.F.M. & PAYÃO FILHO, J. da C. – Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimento de Ferro Fundido Branco Alta-Liga Soldado pelo Processo Arame Tubular Autoprotégido. **III Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste**, p. 181-200, Out. 1994.

D.M. KENNEDY & M.S.J. HASHMI – Test rig design and experimental results of coated systems under impact abrasion conditions. **Surface and Coatings Technology** 86-87 (1996) 493-497.

DIAS, M. F. MARTINS & GOMES, S. I. NOVAES – Avaliação da Resistência ao Desgaste abrasivo a Baixa Tensão de Revestimentos soldados por arco submerso. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação** – 2003.

EDWARDS, G. R. & FROST, R.H. & LIRA, J. C. & RENSE, C E.C. – The Influence of Welding Process Variables on the Microstructure an Abrasion Resistance of Chromium Carbide and Titanium Carbide Contaiming Harfacing Deposits. Presented at: “**Welding Technology 83**”, the 31 st Annual Convention of the Australian Welding. Sydney Australia. Out. 1983.

EUTECTIC&CASTOLIN – Aplicações & Sistemas – **Catálogo Geral de Produtos. Eutectic do Brasil Ltda**, 2003.

FIORE, N.F. & KOSEL, T.H. & FULCHER, J.K. – The Effect of Carbide Volume Fraction on the Low Abrasion Resistance of High Cr-Mo White Cast Irons. **Wear** , p.313-325.1983.

FUJIMURA, H. & KAMITO, Y. & NOTOMI, A. & KINOSHITA, M. - Development of Hard Overlay Welding for High Wear Resistance. **Mitsubishi Heavy Industries Ltda**, Jul. 1988.

GREGOLIN, J. A. R. – Desenvolvimento de Ligas Fe-C-Cr (Nb) Resistentes ao Desgaste. **PPG – Eng. Mecânica**. UNICAMP, 1990.

HERNANDEZ, O. S. – Otimização do Consumível na Solda de Revestimento aplicada na Indústria Sucroalcooleira. **Dissertação de Mestrado**. UFSCar – DEMa, P.P.G. São Carlos – SP, 1997.

KASSIM S. AL-RUBAIE – Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys. **Wear** **243** (2000) 92-100.

KENNETH G. BUDINSKI – Resistance to particle abrasion of selected plastics. **Wear** **203-204** (1997) 302-309

KOTECKI, D.J. & OGBORN, J.S. – Abrasion Resistance of Iron-Based Harfacing Alloys. **Welding Journal**, EUA, 74(8): 269-s-278-s. Aug. 1995.

MARTINS FILHO, A. – Soldagem de Revestimentos com Arame Tubular. **Dissertação de Mestrado**. UFSCar – DEMa, P.P.G. São Carlos – SP, 1995.

MONTEIRO, M. P. & CUNHA, J. A. R. – Tecnologia de Arames Tubulares com Proteção Gasosa para Revestimento Anti-Desgaste para Aplicações em Usinas Sucroalcoleiras e Mineradoras. **ABS – XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem** p. 195-210, Out. 1993.

NOBLE, D. N. – Factors Which Affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits – A Review of the Literature. **The Welding Institute**, 26 p. Out. 1984.

PRISCO, M. – Revestimentos Protetores contra Desgaste - Soldagem de Manutenção. **ABS – ABRAMAN**. p. 231-284.

RAMALHO, JOSÉ PINTO. – Revestimento por Soldagem. **Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem** p. 315-336 - Senai-S.P, 1997.

RAMALHO, JOSÉ PINTO & Jr, LUIZ GIMENES – Processo com eletrodo revestido. **Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem** p. 191-203 - Senai-S.P, 1997.

REBELLO, J.M.A. & PARANHOS, P. & LARA, J.A.C. & GUIMARÃES, A. S. – Resistência ao Desgaste por Abrasão, Dureza e Microestrutura de Revestimentos Duros Depositados por Arco Submerso. **ABS – XIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**, p. 87 – 101, 1987.

SALAZAR, G. – Aplicações de Soldadura em Usinas de Açúcar. **UTP. Nuclear**.

SCOTTI, A. & MELLO, J.D.B. & BÁLSAMO, P.S. DE S. – Influência da Microestrutura sobre a Resistência ao Desgaste de Eletrodos da classe Fe-Cr-C. **ABS – XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem** p. 183-196, 1995.

SILVA, E. P. DA – Influência da adição de Mo e W na Resistência ao Desgaste de Ligas para Revestimento Duro do Sistema Fe-C-Cr. **Tese de Doutorado**, 1998.

SVENSSON,L.E.; GRETOF,B.;ULANDER,B.;BHADESHIA,H.K.D.H. - .Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications. **The Welding Institute**, p.76-83, 1988.

S. W. ZHANG AND ZHAOCHUN YANG – Energy theory of rubber abrasion by a line contact. **Tribology International** - Vol. 30 N° 12, pp. 839 (1997)

S. WIROJANUPATUMP, P.H. SHIPWAY – Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus. **Wear** **239** (2000) 91-101.

TREVISAN, R. E. & BRANTIS, F. C. A. – Efeito dos Parâmetros do Processo de Soldagem nas Propriedades do Revestimento. **ABS - XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem** p. 245-263, Out. 1993.

X. MA, R. LIU, D.Y. LI – Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber wheel abrasion condition. **Wear** **241** (2000) 79-85.

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