AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTOS DUROS

MARCIA FERNANDA MARTINS DIAS

**Tese apresentada à Área Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais da
EESC, IFSC, IQSC, da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciência e
Engenharia de Materiais**

Orientador: Prof. Dr. Samuel Irati Novaes Gomes

**São Carlos – São Paulo
2002**

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037174

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 - CEP 13560-970 - São Carlos-SP - Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@ifsc.usp.br

**MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
MARCIA FERNANDA MARTINS DIAS APRESENTADA À ÁREA
INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS,
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 11-11-2002.**

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Samuel Irati Novaes Gomes (Orientador e Presidente) - EESC-USP

Profa. Dra. Lauralice de Campos Franceschini Canale - EESC-USP

Prof. Dr. José Ângelo Rodrigues Gregolin - UFSCar

Prof. Dr. Ovídio Richard Crnkovic - EESC-USP

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello - UFU

**Ao meu esposo Marcelo e às
minhas filhas Ana Carolina e Ana
Júlia pelo amor e compreensão.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Associado Dr. Samuel Irati Novaes Gomes.

Aos professores Dra. Lauralice de Campos Franceschini Canale, Dr. Ovídio Richard Crnkovic, Dr. Waldek Wladimir Bose Filho e Dr. Luiz Carlos Casteletti do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística.

Aos colegas, Rosamel, Valdinei e André.

Aos técnicos Alberto, Eliezer, João, Pedro e Silvano.

Às secretárias Ana, Eliete, Elza, Érica, Regina e Wladerez.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística.

Ao Sr. Luis Alberto Penazzi, chefe da oficina Mecânica da EESC-USP - São Carlos.

Às minhas irmãs Regina, Ana e Cristina.

Ao meu esposo Marcelo e minhas filhas Ana Carolina e Ana Júlia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – processo n. 95/9788-0.

À indústria Irmãos Panegossi.

À Usina Siderúrgica de Minas Gerais S/A (USIMINAS).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
I – INTRODUÇÃO	01
I.1 – Considerações Gerais	01
I.2 – Concepção deste Trabalho	01
I.3 – Objetivos	02
II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
II.1 – Desgaste	03
II.1.1 – Mecanismos de Danos	03
II.1.2 – Tribologia	03
II.1.3 – Tipos de Desgaste	04
II.1.3.1 – Desgaste Abrasivo	05
II.1.3.2 – Classificações do Desgaste Abrasivo	06
II.1.3.3 – Mecanismos do Desgaste Abrasivo	08
II.1.4 – A Partícula Abrasiva	09
II.1.5 – Desgaste Abrasivo em Metais	10
II.1.5.1 – Dureza	10
II.1.5.2 – Microestrutura	11
II.1.5.2.1 – Microestrutura da Matriz	12
II.1.5.2.2 – Partículas de Segunda Fase	14
II.1.5.3 – Composição Química	15
II.2 – Deposição Superficial (<i>Surfacing</i>)	18
II.2.1 – Revestimento Duro (<i>Hardfacing</i>)	19
II.2.2 – Revestimento Duro para Resistir à Abrasão	20

II.2.3 – Processos de Aplicação de Revestimento por Arco	20
II.3 – Processo de Soldagem por Arco Submerso	22
II.3.1 – Características Gerais	24
II.3.2 – Consumíveis: Eletrodo e Fluxo	25
II.3.3 – Principais Variáveis do Processo	24
II.3.4 – Controle da Diluição	27
II.4 – Ensaios de Desgaste Abrasivo	30
II.4.1 – Ensaio de Desgaste Roda de Borracha/Areia Seca	30
 III- MATERIAIS E MÉTODOS	 33
III.1 – Soldagem dos Cordões	33
III.1.1 – Chapa Base, Arame e Fluxos	33
III.1.2 – Equipamento de Soldagem	33
III.1.3 – Procedimento de Soldagem	33
III.2 – Confeção dos Corpos de Prova	35
III.3 – Ensaios	35
III.3.1 – Ensaio de Dureza Vickers	35
III.3.2 – Ensaio de Desgaste Roda de Borracha/Areia Seca	36
III.4 – Análise Química dos Cordões de Solda	37
III.5 – Análise Metalográfica e Análise Superficial	37
III.5.1 – Macrografia	37
III.5.2 – Micrografia	38
III.5.3 - Fotografia do Corpo de Prova Desgastado	38
III.5.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	38
III.6 – Análise da Areia	39
III.6.1 – Granulometria da Areia	39
III.6.2 – Fotografia da Areia	39
III.7 – Cálculo da Diluição da Chapa Base	39
 IV – RESULTADOS	 41
IV.1 – Análise Química dos Cordões de Solda	41
IV.2 – Fotografia do Corpo de Prova	41
IV.3 – Macrografias	41
IV.4 – Resultados do Ensaio de Dureza Vickers	43
IV.5 – Micrografias	43
IV.6 – Fotografia da Areia	52

IV.7 – Resultados dos Ensaios de Abrasão	53
IV.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura das Regiões Desgastadas	55
IV.9 – Resultados da Diluição da Chapa Base	60
IV.10 – Granulometria da Areia	60
 V – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	 61
V.1 – Análise Química dos Cordões de Solda	61
V.2 – Macrografia	61
V.3 – Ensaio de Dureza Vickers	61
V.4 – Corpo de Prova	63
V.5 – Micrografia	63
V.6 – Areia	64
V.7 – Ensaios de Abrasão	64
V.8 – MEV das Regiões Desgastadas	66
V.9 – Diluição da Chapa Base	66
 VI – CONCLUSÕES	 67
 VII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 68
 VIII – ANEXO 01	 69
 IX – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 70

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Tipos de danos a um material. ^[1]	03
Figura 02 - Esquema de um tribossistema. ^[1]	04
Figura 03 - Esquema dos principais mecanismos de desgaste. ^[1]	05
Figura 04 - Situações onde o desgaste abrasivo é predominante. ^[1]	06
Figura 05 - Classificação do desgaste abrasivo em: abrasão a 2-corpos e abrasão a 3-corpos. ^[1]	06
Figura 06 - Micromecanismos de desgaste abrasivo. ^[5]	08
Figura 07 - Representação esquemática da perda por desgaste por partículas duras em função (a) da dureza do abrasivo e (b) da razão entre a dureza do abrasivo e do material ^[8] .	10
Figura 08 - Diagrama mostrando a resistência relativa ao desgaste como função da dureza de aços recozidos ^[13] .	11
Figura 09 - Perda por desgaste abrasivo de f.f. brancos austeníticos e martensíticos em função do volume de carbeto M_7C_3 . ○ como fundido + 2h a 200°C e ▲ como fundido + 5h a 900°C + 2h a 78°C + 2h a 200°C ^[1]	15
Figura 10 - Perda por desgaste abrasivo medida usando teste de pino-sobre-lixa versus o teor de carbono de diferentes Fe-ligas ^[1] .	16
Figura 11 - Porcentagem de carbono versus perda de massa no depósito. ASTM G-65, proced. A. FB-ferrita/bainita, MS- martensita, MA- martensita e austenita, AM – austenita, PA - austenita primária com eutético austenita-carbeto, NE - quase eutético austenita-carbeto, PC - carbeto primários com austenita-carbeto eutético ^[15] .	17

Figura 12 - Esquema do processo de soldagem por arco submerso ^[25] .	22
Figura 13 - Esquema do Aparato do Ensaio da Roda de borracha/areia seca ^[3] .	31
Figura 14 - Seqüência de soldagem dos cordões.	34
Figura 15 - Posicionamento dos corpos de prova em relação aos cordões.	35
Figura 16 – Dimensões do corpo de prova conforme ASTM G65-94 ^[3] .	35
Figura 17 – Foto do abrasômetro utilizado nos ensaios de desgaste.	36
Figura 18 – Esquema da diluição da chapa base.	39
Figura 19 - Fotografia do corpo de prova após o ensaio de desgaste.	41
Figura 20 - Macrografias dos dois conjuntos de parâmetros de soldagem.	42
Figura 21 – Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1E e 2E.	44
Figura 22 – Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1M e 2M.	45
Figura 23 – Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1L e 2L.	46
Figura 24 - Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1R e 2R.	47
Figura 25 – Fotografias da austenita retida (branca) nas amostras 1E e 2E.	48
Figura 26 – Fotografias da austenita retida (branca) nas amostras 1M e 2M.	49
Figura 27 – Fotografias da austenita retida (branca) nas amostras 1L e 2L.	50
Figura 28 – Fotografias da austenita retida (branca) nas amostras 1R e 2R.	51
Figura 29 - Fotografia da areia utilizada no ensaio de abrasão.	52
Figura 30 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1E e 2E.	56

Figura 31 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1M e 2M.	57
Figura 32 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1L e 2L.	58
Figura 33 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1R e 2R.	59
Figura 34 – Dureza dos oito cordões de solda.	62
Figura 35 – Dureza em função do teor de carbono das amostras.	62
Figura 36 – Perda de volume dos oito cordões de solda e do metal base.	65
Figura 37 - Perda de volume das amostras em função do teor de carbono.	65
Figura 38 – Perda de volume em função da dureza das amostras.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Classificação do desgaste abrasivo conforme a situação do processo de desgaste. ^[4]	07
Tabela 02 - Classificação do desgaste abrasivo conforme a severidade do desgaste. ^[4]	07
Tabela 03 - Dois conjuntos de parâmetros de soldagem dos cordões de solda.	34
Tabela 04 - Condições de soldagem dos oito cordões de solda.	35
Tabela 05 - Parâmetros do ensaio de desgaste.	37
Tabela 06 - Análise química dos oito cordões de solda.	41
Tabela 07 - Medidas de dureza Vickers dos cordões de solda	43
Tabela 8.1 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1E.	53
Tabela 8.2 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2E.	53
Tabela 8.3 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1M.	53
Tabela 8.4 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2M.	54
Tabela 8.5 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1L.	54
Tabela 8.6 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2L.	54
Tabela 8.7 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1R.	54
Tabela 8.8 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2R.	55
Tabela 8.9 - Resultados dos ensaios de abrasão da amostra P.	55

Tabela 09 - Resultados do ensaio de abrasão mostrando o coeficiente de variação, a média e o desvio padrão das amostras 1E, 2E, 1M, 2M, 1L, 2L, 1R, 2R e P. 55

Tabela 10 – Cinco medidas das áreas do reforço (A_r) para cada conjunto. 60

Tabela 11 – Cinco medidas das áreas da chapa diluída (A_p) para cada conjunto. 60

Tabela 12 – Resultado do cálculo da diluição para cada conjunto. 60

Tabela 13 – Granulometria da areia 60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

σ_e	limite de escoamento
μm	micrometro
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
A	<i>Ampers</i>
A	austenita
α	ângulo de ataque
AM	austenita
A/mm ²	<i>Ampers</i> por milímetros quadrados
Ap	área da chapa base diluída
Ar	área do reforço
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
B	bainita
C	Carbono
C	carbeto
CC-	Corrente contínua com polaridade direta
CC+	Corrente contínua com polaridade inversa
cm/min	centímetros por minuto
cp	corpo de prova
Cr	Cromo
FB	ferrita/bainita
D	diluição da chapa base
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i> – soldagem por arame tubular
F	ferrita
Fe	Ferro
g	gramas
g/cm ³	gramas por centímetros cúbicos
g/min	gramas por minuto
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> – soldagem MIG - MAG
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> – soldagem TIG
h	hora
HRc	Dureza Rockwell C

HV	Dureza Vickers
M	martensita
MA	martensita e austenita
MS	martensita
mA	austenita metaestável
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	milímetros
mm ²	milímetros quadrados
mm ³	milímetros cúbicos
Mo	Molibdênio
MPa	mega Pascal
N	Newton
n.	número
NE	quase eutético austenita-carbeto
Ni	Níquel
P	perlita
p.	páginas
PA	austenita primária com eutético austenita-carbeto
PC	carbeto primário com austenita-carbeto eutético
rpm	rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> – soldagem por arco submerso
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> – soldagem por eletrodo revestido
Si	Silício
$\sigma_x (n-1)$	desvio padrão
V	Vanádio
V	Volts
v.	volume
W	Tungstênio

RESUMO

DIAS; M.F.M. (2002). *Avaliação dos Parâmetros de Soldagem na Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Duros*. São Carlos, 2002. 82 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta uma análise das condições de soldagem sobre o desgaste abrasivo de um revestimento duro. O revestimento foi feito pela deposição metálica por arco submerso variando os parâmetros de soldagem e utilizando fluxos comerciais. Foram utilizados dois conjuntos de parâmetros de soldagem (conjunto 01 com velocidade de soldagem de 55cm/min, extensão do eletrodo de 35,0mm, tensão de 30V, corrente de 450A e o conjunto 02 com velocidade de soldagem de 50cm/min, extensão do eletrodo de 25,5mm, tensão do arco de 26V e corrente de 440A) e quatro fluxos comerciais (identificados como E, M, L e R) formando assim oito condições de soldagem. Foram feitas duas camadas com três cordões de solda cada sobre uma chapa base de aço SAE 1020. Corrente contínua com polaridade direta (CC-) foi utilizada em ambas condições. A resistência ao desgaste abrasivo a baixa-tensão foi avaliada pelo ensaio de desgaste do tipo Roda de borracha/areia seca conforme a Norma ASTM G65 – 94. A análise microestrutural foi feita por microscopia óptica e a análise da região desgastada por microscopia eletrônica de varredura. A resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos do conjunto 01 foi superior em comparação com os revestimentos do conjunto 02, para todos os fluxos utilizados. Os fluxos E e R proporcionaram os melhores desempenhos e a martensita de agulhas foi a microestrutura com a qual foram obtidos os melhores resultados de desgaste abrasivo a baixa-tensão neste estudo realizado.

Palavras-chave: revestimento duro, arco submerso, desgaste abrasivo.

ABSTRACT

DIAS; M.F.M. (2002). *Evaluation of the Welding Variables on the Abrasion Resistance of Hardfacings*. São Carlos, 2002. 82 p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents an analysis of the welding conditions and its effects in the abrasive wear of hardfacings. The hardfacings were obtained by submerged arc surfacing. The welding variables were changed and the commercial fluxes were used. Two groups of welding variables were used (group 01: a travel speed of 55cm/min, an electrode extension of 35,0mm, a voltage of 30V and an amperage of 450A; group 02: a travel speed of 50cm/min, an electrode extension of 25,0mm, a voltage of 26V and an amperage of 440A) and four commercial fluxes (E, M, L e R designated) establishing eight welding conditions. Double-layered of three beads were deposited (applied) on a SAE 1020 base metal plate. Direct current electrode negative polarity (CC-) were used in both groups of welding. The low stress abrasion resistance evaluation was carried out by dry sand/rubber wheel apparatus according to the ASTM G65-94. The microstructural analysis were done by optical microscopy and the worn surface analysis were done by scanning electronic microscopy. The abrasion resistance of the group 01 was superior as compared to the group 02, independent of the flux used. The fluxes E and R presented the best results and the better abrasion resistant microstructure was lath martensite.

Key-words: hardfacing, submerged arc welding, abrasive wear.

I - INTRODUÇÃO

I.1 – Considerações Gerais

O desgaste está presente no contexto da história do homem desde os primórdios. Ele ocorre no cotidiano das pessoas como no constante atrito da sola dos calçados com o chão, no ato de polir uma panela e nas articulações do corpo humano.

Nas diversas indústrias (química, alimentícia, sucroalcooleira, automobilística, naval e etc), na agricultura, na mineração e em vários outros segmentos é que o desgaste torna-se um grande problema, pois a substituição ou a recuperação de peças e equipamentos ou parte deles e suas consequências representam custos adicionais elevados. Daí vem a importância dos revestimentos como uma alternativa relativamente mais barata de recuperação de equipamentos ou parte deles e aumento da vida útil dos equipamentos sem a necessidade da troca dos mesmos, o que seria oneroso para todos os setores.

O desgaste é um fenômeno complexo, pois a resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca dos materiais e depende das condições tribológicas que são muito diversificadas. Assim, pesquisas nessa área são importantes porque possibilitam desvendar este campo da ciência.

Estudos para melhorar o desempenho de equipamentos e peças agrícolas vêm de encontro com uma realidade brasileira sendo o Brasil um país com base econômica na agricultura e na pecuária. Este trabalho pretende dar uma contribuição no campo de pesquisas e aplicação de revestimentos duros aplicados em equipamentos agrícolas.

I.2 – Concepção deste Trabalho

A concepção deste trabalho foi feita com base em uma visita à indústria Irmãos Panegossi, situada na cidade de Matão, que recupera peças rodantes ('links' – elos) de tratores utilizados na agricultura. Estas peças são parte das esteiras rolantes dos tratores e sofrem desgaste abrasivo nas mais diversificadas formações geológicas destinadas à agricultura, apesar de não trabalharem diretamente em contato com o solo. Nesta indústria essas peças são recuperadas

pelo processo de soldagem por arco submerso com uma mistura de dois fluxos comerciais.

Com os dados recolhidos na indústria foi feito um estudo de como poderia ser melhorado o desempenho destas peças com modificações nos parâmetros de soldagem e/ou no fluxo utilizado. Foram feitas modificações na tensão do arco, na corrente de soldagem, na velocidade de soldagem e na extensão do eletrodo. Os fluxos utilizados foram os em disposição no mercado nacional. Então, variando-se as condições de soldagem avaliou-se a influência dos conjuntos de parâmetros de soldagem e dos fluxos utilizados no desempenho dos revestimentos duros sob desgaste abrasivo a baixa-tensão.

Este trabalho vem contribuir no campo das pesquisas de soldagem e de desgaste e apresenta resultados originais na avaliação desse tipo de revestimento utilizado pela indústria nacional.

I.3 – Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo das condições de soldagem por arco submerso e sua influência sobre a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos duros. Foram analisados dois conjuntos de parâmetros de soldagem com quatro fluxos comerciais objetivando melhorar o desempenho dos revestimentos soldados por arco submerso quando submetidos a um desgaste abrasivo a baixa-tensão.

II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1- Desgaste

II.1.1- Mecanismos de Danos

A falha de um componente ou estrutura pode ocorrer devido a danos por deformação plástica, formação e propagação de trincas, corrosão e desgaste. A Figura 01 é uma síntese desses tipos de danos

Deformações elásticas e principalmente plásticas podem resultar na incapacidade da estrutura em suportar forças, executar a função planejada ou interferir em outros componentes operacionais. As trincas podem crescer subcriticamente ou criticamente e levar a falhas catastróficas de um componente ou estrutura. A corrosão e o desgaste são mecanismos que primeiramente prejudicam a superfície dos componentes.

Figura 01 - Tipos de danos a um material. ^[1]

II.1.2- Tribologia

Tribologia é uma palavra derivada do grego *tribos* que significa atrito, fricção. A tribologia, conforme Zum Gahr ^[1], é a ciência e a tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas. A tribologia engloba a investigação científica de todos os tipos de atrito, lubrificação, desgaste e também a aplicação técnica desses conhecimentos.

Conforme a norma DIN 50320 um tribossistema é composto de quatro elementos básicos: o corpo sólido, o contracorpo, o elemento interfacial e o meio. O contracorpo pode ser um sólido, líquido ou gasoso, ou a mistura deles. Os

elementos interfaciais podem ser lubrificantes, camadas adsorvidas, poeira, um líquido, um gás ou a mistura deles. A Figura 02 é o esquemático de um tribossistema.

Figura 02 - Esquema de um tribossistema mostrando os elementos que o compõem ^[1].

No livro de Zum Gahr ^[1] são citadas duas definições para desgaste. Uma delas define desgaste como “uma perda progressiva de material de uma superfície de um corpo em operação que ocorre como resultado de um movimento relativo na superfície”. Para a norma DIN 50320 o desgaste é “uma perda progressiva de material de uma superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e o movimento relativo contra um contracorpo sólido, líquido ou gasoso”.

Segundo o dicionário Aurélio ^[2] desgaste é o ato ou efeito de desgastar-se. Desgastar é gastar ou consumir pelo atrito; gastar; destruir; gastar-se ou destruir-se pouco a pouco.

II.1.3- Tipos de Desgaste

Há muitos termos na literatura para descrever os processos de desgaste. Geralmente, a classificação desses processos é feita pelo mecanismo de desgaste predominante. Assim, conforme Zum Gahr ^[1] quatro são os mecanismos principais:

- **Adesão:** ocorre a formação e a quebra de ligações adesivas interfaciais, como nas junções soldadas a frio. Componentes como cames, engrenagens e mancais podem sofrer esse tipo de desgaste.
- **Abrasão:** ocorre a remoção de material devido ao riscamento, destacamento, sulcamento e etc. Calhas, extrusoras, pás escavadeiras são alguns exemplos onde a abrasão pode ocorrer.

- **Fadiga Superficial (de Contato):** ocorre fadiga e formação de trincas nas regiões superficiais devido a ciclos de tensão tribológicos que resultam na separação de material. Pode ocorrer em engrenagens, rolamentos, laminação e outros.
- **Reação Triboquímica:** ocorre a formação de produtos de reação química como resultado das interações químicas entre os elementos de um tribossistema. Correntes, molas, pistões, juntas rebitadas e etc podem sofrer esse tipo de desgaste.

A Figura 03 fornece um panorama geral dos quatro tipos de desgaste citados acima.

Figura 03 – Representação esquemática dos principais mecanismos de desgaste. ^[1]

II.1.3.1- Desgaste Abrasivo

Segundo a norma ASTM G65-94 ^[3] o desgaste abrasivo é devido às partículas duras ou protuberâncias duras que são forçadas em movimento contra uma superfície sólida.

Conforme Zum Gahr ^[1], o desgaste abrasivo é o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras entre ou embutidas em uma ou ambas superfícies em movimento relativo, ou pela presença de protuberâncias em uma ou ambas superfícies em movimento relativo. A Figura 04 mostra situações práticas onde o desgaste abrasivo é predominante como em calhas, sistemas hidráulicos com poeiras, extrusoras, trituradores, matrizes para metalurgia do pó e deslizamento sobre superfícies rugosas.

Figura 04 - Situações onde o desgaste abrasivo é predominante. ^[1]

II.1.3.2- Classificações do Desgaste Abrasivo

A classificação do desgaste abrasivo em duas categorias básicas: abrasão a 2-corpos e abrasão a 3-corpos é amplamente utilizada. A Figura 05 mostra essas duas categorias.

Na abrasão a 2-corpos a partícula abrasiva move-se livremente sobre a face do material como ocorre quando areia escorrega em uma calha ou em uma dragagem de areia e cascalho. Na abrasão a 3-corpos, a partícula abrasiva age como um elemento interfacial entre o corpo e o contracorpo como em uma rosca de extrusoras e britadeiras. O desgaste é aproximadamente uma a duas ordens de magnitude menor no desgaste a 3-corpos em relação ao desgaste a 2-corpos. No desgaste a 3-corpos somente uma pequena porção das partículas provoca desgaste devido à variação no ângulo de ataque (α).

Figura 05 - Classificação do desgaste abrasivo em: abrasão a 2-corpos e abrasão a 3-corpos. ^[1]

Outra classificação utilizada divide o desgaste abrasivo em 3 categorias: abrasão por sulcamento (*gouging*), abrasão a alta-tensão (*grinding*) e abrasão a baixa-tensão (*scratching*). Na abrasão por sulcamento ocorrem sulcos profundos e largos e destacamentos de material. Na abrasão a alta-tensão as partículas abrasivas fraturam-se durante o processo enquanto que na abrasão a baixa-tensão o abrasivo não se fratura.

Gates ^[4] questiona essas duas classificações citadas anteriormente e propõe duas novas classificações. Uma delas baseada na situação do processo de desgaste, apresentada na Tabela 01 e a outra baseada na severidade do desgaste, apresentada na Tabela 02.

Tabela 01 - Classificação do desgaste abrasivo conforme a situação do processo de desgaste. ^[4]

		Tensão de contato		
		Baixa (abrasivo não fratura)	Alta (abrasivo fratura)	Extrema
Abrasivo	livre	Baixa tensão abrasivo-livre	Alta-tensão abrasivo-livre	
	fixo	Baixa-tensão abrasivo-fixo	Alta-tensão abrasivo-fixo	Extrema-tensão abrasivo-fixo

Tabela 02 - Classificação do desgaste abrasivo conforme a severidade do desgaste. ^[4]

Situações típicas	Modo de desgaste		
	Médio	Severo	Extremo
Tamanho da partícula	Pequeno	Moderado	Grande
Restrição	Não fixa	Parcialmente fixa	Fixa
Forma da partícula	Arredondada	Angulosa	Angulosa
Tensão de contato	Baixa (abrasivo não fratura)	Moderada (abrasivo fratura)	Muito Alta (pode causar deformação ou fratura frágil)
Mecanismo dominante	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte ou microtrinca
Termos equivalentes	Abrasão baixa-tensão	Abrasão alta-tensão	Sulcamento
	Baixa-tensão 3-corpos	Alta-tensão 3-corpos Baixa-tensão 2-corpos	Alta-tensão 2-corpos

II.1.3.3- Mecanismos do Desgaste Abrasivo

Alguns mecanismos têm sido apresentados para descrever como é removido o material da superfície durante o processo de abrasão. Tylczak ^[5] apresenta cinco mecanismos ilustrados na Figura 06 que incluem os quatro mecanismos apresentados por Zum Gahr ^[1] e mais um denominado de cunha.

No sulcamento a perda de material pode ocorrer devido à ação de muitas partículas abrasivas agindo simultaneamente ou sucessivamente. O material deslocado lateralmente ao sulco sofre ação repetidamente do abrasivo o que pode resultar na perda de material por microfadiga. Na ponta do abrasivo pode ocorrer a formação de uma cunha e, neste caso, a quantidade de material deslocado do sulco é maior que a quantidade de material deslocado para os lados.

A mais severa forma de mecanismo de desgaste para materiais dúcteis é o microcorte. Neste mecanismo a ponta do abrasivo remove um volume igual ao sulco produzido. Os mecanismos de microcorte e microcassulamento são as interações dominantes nos materiais dúcteis. A proporção entre a ocorrência de microcassulamento e microcorte depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva. Quanto maior o ângulo de ataque maior a proporção de microcorte.

Microtrincas podem ocorrer quando altas concentrações de tensões são impostas pelo abrasivo, particularmente entre materiais frágeis. Neste caso, grandes detritos de desgaste são destacados da superfície devido à formação e propagação dessas trincas.

Figura 06 - Micromecanismos de desgaste abrasivo. ^[5]

II.1.4 - A Partícula Abrasiva

A partícula abrasiva pode ser um produto do processamento, um fragmento de desgaste, ser originada de fora do tribossistema (poeira) ou pode ser uma asperidade ou protuberância superficial. A forma, o tamanho e a dureza da partícula abrasiva são determinantes nas condições do desgaste abrasivo. O quartzo é a partícula abrasiva mais abundante na natureza e a principal nas operações de mineração e terraplanagem.

Os estudos de Vetter e Swanson ^[6] feitos com aço carbono utilizando o ensaio da roda de borracha/areia seca (ASTM G65-94 procedimento B ^[3]) mostraram que ocorre maior perda de massa com maior angularidade do abrasivo. Outro aspecto interessante é que no reaproveitamento do abrasivo a angularidade das partículas diminuiu significativamente para partículas mais angulosas, enquanto que as partículas arredondadas não foram afetadas. Assim, partículas abrasivas angulares não devem ser reutilizadas nestes tipos de ensaio, mas as arredondadas podem.

Sendo o desgaste um fenômeno muito complexo, pequenas modificações no tribossistema provocam grandes alterações como mostrado no trabalho de Dube e Hutchings ^[7] que utilizaram aço 1020 e o ensaio da roda de borracha/areia seca modificado. Encontraram que a taxa de desgaste foi maior para as partículas angulosas em relação às arredondadas, comparando as partículas de menor tamanho (125-150µm), independentemente de ser abrasão a alta ou baixa-tensão. Para as partículas maiores (425-500µm) na abrasão a baixa-tensão ocorreu o mesmo das partículas menores, enquanto para alta-tensão a taxa de desgaste foi igual para ambos tipos de partícula. Outro aspecto é que ocorreu fratura da partícula abrasiva em todas as condições e para os dois tipos de abrasivo, mas essa situação foi mais acentuada para as partículas maiores a alta-tensão e menos acentuada para as partículas maiores a baixa-tensão.

No trabalho de Zum Gahr ^[8] foram mostradas algumas tendências do comportamento do desgaste dos materiais dependendo das propriedades da partícula abrasiva. Com o aumento da dureza do abrasivo, a perda por desgaste pode aumentar de uma a duas ordens de grandeza, ou seja, de um baixo para um alto nível. Esta transição depende da razão entre a dureza da partícula e a do material a ser desgastado. O aumento de baixo para alto nível de desgaste ocorre para materiais monofásicos quando a dureza do abrasivo é igual a dureza do material. Para materiais polifásicos, esta transição começa e termina quando as

durezas da matriz e da fase reforçadora são excedidas pela dureza da partícula abrasiva. Em altos níveis de desgaste, a perda por desgaste de materiais polifásicos pode ser maior do que o para os monofásicos, pois a fase reforçadora pode ser destacada e a matriz sofrer desgaste. Na Figura 07 estão apresentadas as perdas por desgaste em função dessas propriedades do abrasivo. Importantes parâmetros operacionais são também o tamanho médio da partícula abrasiva, a carga normal aplicada, e durante o desgaste erosivo, a velocidade de colisão das partículas duras.

Misra e Finnie^[9,10] observaram em metais puros que os efeitos do tamanho e da dureza da partícula abrasiva são similares para o desgaste a 2-corpos e 3-corpos.

Figura 07 - Representação esquemática da perda por desgaste por partículas duras em função (a) da dureza do abrasivo e (b) da razão entre a dureza do abrasivo e do material^[8].

II.1.5- Desgaste Abrasivo em Metais

Os metais e ligas metálicas são os mais importantes materiais para componentes sujeitos ao desgaste abrasivo. A seleção dos materiais resistentes ao desgaste abrasivo é feita através das propriedades como dureza, tenacidade à fratura, ductilidade, distribuição da deformação, anisotropia cristalina, encruamento e microestrutura. Algumas dessas propriedades serão discutidas abaixo.

II.1.5.1- Dureza

A dureza é amplamente utilizada como referência à resistência ao desgaste devido a sua facilidade de obtenção e por ser um ensaio não destrutivo. Para metais puros e aços recozidos observou-se que a resistência ao desgaste

abrasivo aumenta linearmente com a dureza [1, 12, 13, 14]. Esta afirmação já não é válida para aços revenidos e temperados, ferros fundidos e ligas, para os quais a microestrutura e o teor de carbono são mais importantes [15].

O trabalho de Larsen-Badsen e Mathew [12] mostra, também, uma relação não linear entre a resistência ao desgaste abrasivo e estruturas de martensita revenida em ensaios de pino-sobre-lixo.

Os estudos de Xu e Kennon [13] em aços carbono (0,10% - 1,40% C) com diferentes microestruturas, durezas e utilizando o ensaio pino-sobre-tambor apresentaram linearidade entre a dureza e a resistência à abrasão para aços recozidos, variando-se a inclinação das retas para aços hipoeutetóides e hipereutetóides, como mostra a Figura 08. Aços temperados e revenidos não apresentaram essa linearidade.

Figura 08 - Diagrama mostrando a resistência relativa ao desgaste como função da dureza de aços recozidos [13].

No trabalho de Kotecki e Ogborn [15] com revestimentos duros, a resistência ao desgaste abrasivo a baixa-tensão (ASTM G-65) não foi linearmente proporcional à dureza, somente observou-se agrupamentos de dados de acordo com diferentes microestruturas.

II.1.5.2 - Microestrutura

A microestrutura final de um material submetido ao desgaste abrasivo é uma das características principais a ser considerada. A microestrutura depende da composição química, dos processos de produção e dos tratamentos (térmicos, superficiais, mecânicos ou químicos) posteriores. São importantes para o

desgaste abrasivo a microestrutura da matriz, as inclusões, as partículas de segunda fase, os defeitos cristalográficos e a anisotropia cristalina.

II.1.5.2.1 - Microestrutura da Matriz

A matriz pode ser constituída de metal puro ou liga e pode ser monofásica ou polifásica. A resistência à abrasão depende das propriedades da matriz, dos constituintes embebidos na matriz, das interações entre as fases e dos parâmetros do tribossistema (carga, partícula abrasiva, etc.) ^[1, 9, 11].

Para metais puros a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a sua dureza como citado anteriormente ^[1, 12, 13, 14].

De um modo geral a resistência ao desgaste abrasivo aumenta com a variação de microestrutura dos aços na seqüência de ferrita, perlita, ferrita-martensita, bainita e martensita.

Estruturas perlíticas com menor espaçamento interlamelar (mais refinadas) possuem uma maior resistência à abrasão e isto ocorre devido ao aumento da dureza fase perlítica ^[1].

Em estruturas ferrítica-martensíticas variando-se a fração volumétrica das estruturas verificou-se em teste de pino-sobre-lixo que a resistência ao desgaste diminui com a diminuição da dureza da martensita e aumenta com o aumento da fração volumétrica de martensita ^[1].

Estruturas bainíticas exibem menor perda por desgaste em relação à martensita revenida. Este melhor resultado das estruturas bainíticas deve-se ao fato da alta fração volumétrica de austenita retida (até 20%) na bainita comparada com menos de 6% na martensita temperada. A austenita retida pode ser prejudicial se o desgaste abrasivo for acompanhado por repetido impacto e fadiga.

Kotecki e Ogborn ^[15] realizaram um extenso estudo com revestimentos duros com diferentes composições químicas, microestruturas e durezas. Esses revestimentos foram feitos por soldagem por arco elétrico (SMAW, FCAW, SAW) e submetidos ao ensaio de desgaste roda de borracha/areia seca. Na faixa com menos de 1% de carbono, estruturas martensíticas (sem partículas endurecedoras) têm claras vantagens sobre estruturas austeníticas. Entre 1% e 2% de carbono austenita primária com eutético forma-se, mas o desempenho não é melhor que o da martensita. Acima de 2% de carbono ocorre aumento do eutético austenita-carbeto e menos austenita primária e a resistência à abrasão é melhor em relação à martensita. Na faixa de 3% a 4% de carbono (onde a microestrutura é quase

eutética) aparecem os carbeto primários e a resistência à abrasão é dominada pelo eutético austenita-carbeto. Acima de 4% de carbono a resistência à abrasão é dominada pelos carbeto primários que apresentam as melhores resultados em comparação às todas as microestruturas anteriores. Os autores encontraram uma boa correlação entre o teor de carbono e a resistência à abrasão dos revestimentos sendo que, no geral, quanto maior o teor de carbono melhor a resistência ao desgaste abrasivo. Uma das conclusões relevantes deste trabalho é que a microestrutura e não a dureza é o fator principal na determinação da resistência ao desgaste abrasivo em ensaios de roda-de-borracha/areia-seca para revestimentos de ligas ferrosas.

Xu e Kennon ^[13] avaliaram a resistência à abrasão de aços com 0,10% a 1,4% de carbono utilizando o ensaio de pino-sobre-tambor. Para aços hipoeutetóides uma maior fração volumétrica de perlita resultou em uma maior resistência ao desgaste, indicando que a perlita inibe microtrincas através da ferrita. Para aços com teor de carbono menor que 1% a bainita apresentou uma maior resistência ao desgaste, seguida por estruturas temperadas e revenidas. Esta maior resistência das estruturas bainíticas deve-se ao fato da presença de austenita retida em uma maior quantidade em relação às outras estruturas. Os autores concluíram que a microestrutura é mais importante para a abrasão do que a dureza e o teor de carbono e também que o micromecanismo de desgaste predominante para todas as estruturas foi o microcorte.

Os estudos de Yang e Garrison ^[16] mostraram que a austenita retida tem aumentado a resistência à abrasão a 2-corpos e ela também tem uma influência similar na abrasão a 3-corpos. A influência da austenita retida no desgaste abrasivo tem sido atribuída a um aumento da dureza superficial devido à transformação da austenita em martensita de alto carbono. Esta transformação sugere-se que leva a formação de tensões de compressão na superfície que aumentam a dureza local e melhoram a resistência ao desgaste.

Prasad e Prasad ^[17] estudaram as mudanças na microestrutura subsuperficial induzidas pelo ensaio de abrasão roda de borracha/areia seca de um aço carbono (0,5%C). Concluíram que essas mudanças ocorreram consideravelmente nos aços não endurecidos. No caso dos aços recozidos a dureza subsuperficial aumentou e a microestrutura mudou sugerindo uma transformação de fase localizada (reaustenitização seguida de transformação martensítica), sendo que a resolução desta camada não foi possível.

II.1.5.2.2- Partículas de Segunda Fase

As partículas de segunda fase (precipitados intermetálicos, carbeto e etc.) são importantes para reforçar os materiais metálicos ^[1].

Os carbeto são os mais importantes para o desgaste abrasivo e são formados da ligação química entre o carbono e um metal ou mais (carbeto complexos), podendo ter as seguintes estequiometrias: MC, M_3C , M_4C_3 , M_6C e M_7C_3 , sendo que M é o átomo de um metal (Fe, Cr, W, V, Nb, etc.). A forma, o tamanho, a fração volumétrica, a distribuição dos carbeto na matriz e a coesão dos carbeto com a matriz influenciam na resistência ao desgaste.

De uma maneira geral um aumento na fração de carbeto primário aumenta a resistência ao desgaste de ferros fundidos brancos independentemente da matriz ser austenítica ou martensítica ^[1]. A Figura 09 ilustra esta tendência. Até 30% da fração volumétrica de carbeto há aumento da resistência ao desgaste abrasivo, além disso, microtrincamento e espalhamento dos carbeto diminuem essa resistência.

He e Zhang ^[18] estudaram o efeito dos carbeto secundários no desgaste abrasivo a 3-corpos em um aço alto carbono martensítico com variadas frações de carbeto. Quando a partícula abrasiva utilizada foi sílica, os carbeto não resistiram, sofreram microcorte devido ao chamado “efeito tamanho”, destacamento da matriz e assim a resistência ao desgaste diminuiu com aumento da fração de carbeto. Quando a partícula utilizada foi areia de vidro (*glass sand*) (550 HV) houve aumento da resistência ao desgaste, pois o micromecanismo de remoção de material foi o micropite.

Os estudos de Paranhos e outros ^[20] em ligas Fe-C-Cr para revestimento mostraram que a microestrutura de maior resistência à abrasão a baixa tensão é constituída de carbeto primário M_7C_3 e eutético austenita-carbeto (M_7C_3).

Figura 09 - Perda por desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos austeníticos e martensíticos em função do volume de carbeto M_7C_3 . ○ como fundido + 2h a 200°C e ▲ como fundido + 5h a 900°C + 2h a 78°C + 2h a 200°C . ^[1]

Bálsamo et al. ^[21] em estudos com revestimentos duros com carbeto de Cr mostraram que as estruturas com maior porcentagem volumétrica de carbeto de cromo apresentaram melhor resistência à abrasão e que a dureza relativa é um excelente indicador do comportamento em relação à abrasão. Em outro trabalho Bálsamo et al. ^[22] concluíram que o tamanho dos carbeto, principalmente dos carbeto eutéticos, é um parâmetro mais influente do que a fração volumétrica para ligas resistentes ao desgaste da classe Fe-C-Cr.

Os compósitos de carbeto de tungstênio possuem uma alta resistência à abrasão, mas baixa resistência ao impacto. Esses compósitos possuem a vantagem de que o tamanho das partículas duras no depósito pode ser controlado e isto é importante porque a resistência à abrasão depende da relação entre o tamanho do abrasivo e do carbeto. ^[19]

II.1.5.3- Composição Química

A composição química é um dos fatores determinantes da microestrutura do material.

O principal elemento químico para os aços e ferros fundidos é o carbono. Muitos autores ^[1, 15, 20, 23] relatam que a resistência ao desgaste abrasivo desses materiais aumenta com o teor de carbono. Isto é decorrente de diversos fatores como ao aumento da capacidade de encruamento da austenita, aumento da dureza da martensita, aumento da fração volumétrica de carbeto, aumento do volume de perlita ou martensita em aços hipoeutéticos. A Figura 10 mostra a perda por

desgaste abrasivo em função do teor de carbono fornecendo um panorama geral das ligas ferrosas.

Figura 10 - Perda por desgaste abrasivo medida usando teste de pino-sobre-lixia versus o teor de carbono de diferentes Fe-ligas ^[1].

Kotecki e Ogborn ^[15] estudaram o efeito do carbono em revestimentos e verificaram, na faixa de teor de carbono de até 6%, ocorre aumento da resistência à abrasão conforme o aumento do teor de carbono. Isto ocorre devido à variação na microestrutura dos revestimentos que na região de baixo carbono (< 1%C) é constituída de ferrita/bainita e na região de alto carbono (> 4%C) é dominada por carbeto primários. A Figura 11 mostra a perda por desgaste em função do teor de carbono nos diversos revestimentos.

Figura 11 - Porcentagem de carbono versus perda de massa no depósito. ASTM G-65, proced. A. FB - ferrita/bainita, MS - martensita, MA - martensita e austenita, AM - austenita, PA - austenita primária com eutético austenita-carbeto, NE - quase eutético austenita-carbeto, PC - carbeto primários com austenita-carbeto eutético^[15].

Xu e Kennon^[13] analisaram a resistência à abrasão de aços com teores de carbono de 0.10% a 1.4%. Eles obtiveram uma relação linear entre o teor de carbono e a resistência à abrasão, porém com diferentes inclinações para aços hipoeutéticos e hipereutéticos.

Paranhos et al.^[20] em estudos com revestimentos Fe-C-Cr concluíram que o carbono é o elemento mais importante na determinação da microestrutura. Teores acima de 3.8%C e de 25%Cr induzem à formação de uma microestrutura constituída de carbeto primário M_7C_3 e eutético austenita-carbeto (M_7C_3).

Dasgupta et al.^[24] em ensaios com roda de borracha/areia seca mostraram que em revestimentos com diferentes porcentagens de cromo o melhor resultado foi apresentado com a amostra com maior porcentagem de cromo (6%) em todas as condições experimentais.

II.2- Deposição Superficial (*Surfacing*)

Deposição superficial é o processo pelo qual uma camada de material é depositada sobre um metal de base ou substrato para se obter propriedades e/ou dimensões desejadas. A deposição superficial é feita por processos de soldagem, brasagem ou aspersão térmica (*thermo spray*). A deposição é utilizada onde a resistência à corrosão e ao desgaste, onde os controles dimensionais e metalúrgicos são necessários. Este processo está dividido em: *surface cladding*, *hardfacing* (revestimento duro), *buildup and buttering* ^[25].

Em *surface cladding*, uma camada relativamente grossa de metal é depositada sobre um aço carbono ou um aço baixa liga com a finalidade de fornecer uma superfície resistente à corrosão. Como regra, a resistência mecânica deste revestimento não é considerada no projeto do componente.

No revestimento duro (*hardfacing*), uma camada de metal é aplicada para reduzir o desgaste superficial à abrasão, ao impacto, à erosão, à descamação, ou à cavitação. Como para o *surface cladding* a resistência mecânica deste revestimento não é considerada no projeto do componente.

O termo *buildup* designa a adição de uma solda metálica em uma superfície metálica, em uma borda de uma junta, ou uma solda depositada para a reconstrução dimensional de um componente. Neste caso, a resistência da solda é uma condição do projeto do componente.

Buttering designa a adição de uma ou mais camadas de solda sobre uma superfície, mas neste caso é uma superfície a ser soldada. Difere do *buildup* por ser utilizado para controle das propriedades e não dimensional.

As propriedades mais importantes de um revestimento superficial para aplicações específicas são:

- Dureza: macrodureza, microdureza e dureza a quente.
- Resistência à abrasão: resistência sob baixa e alta tensão e alta tensão com impacto.
- Resistência ao impacto: resistência à deformação plástica sob impacto repetido, resistência ao trincamento sob impacto.
- Resistência ao Calor: resistência ao revenido, retenção de resistência quando aquecido, resistência a fluência, resistência a oxidação ou corrosão por gases quentes, resistência a fadiga térmica.
- Resistência à corrosão.

- Resistência ao desgaste metal-metal: coeficientes de atrito, tendência à descamação, filmes superficiais, lubrificação e plasticidade.
- Resistência ao desgaste erosivo: choque de baixos e altos ângulos por partículas sólidas, erosão por gotas líquidas e cavitação.
- Microestrutura final: tamanho de grão, microestrutura da matriz, partículas de segunda fase.

II.2.1- Revestimento Duro (*Hardfacing*)

O revestimento duro é geralmente depositado por processos de soldagem por arco elétrico. Adequados metais para esta aplicação estão na forma de varetas nuas, eletrodos revestidos, bobinas de arames sólidos ou tubulares, pastas e pós. Especificações para metais de deposição são difíceis de se desenvolver devido aos testes de avaliação não estarem ainda bem normalizados. Entretanto há 18 classificações de varetas nuas e eletrodos para soldagem e 20 classificações de eletrodos revestidos na ANSI/AWS A5.13 (Especificação para eletrodos e varetas de soldagem para revestimento), cobrindo ligas de ferro, níquel, cobalto e cobre. Além disso, nove classificações de eletrodos e varetas de compósitos à base de ferro e oito classificações de varetas de carbetos de tungstênio para soldagem estão incluídas na ANSI/AWS A5.21 (Especificação para varetas e eletrodos para soldagem de revestimentos compostos) ^[25].

Com um revestimento superficial pretende-se aumentar a vida útil de componentes, mas devido às condições que causam desgaste serem variadas e complexas, uma simples correlação entre as propriedades do revestimento e a vida útil é muito difícil de ser estabelecida. A melhor aproximação parece ser uma cuidadosa análise das condições de serviço, seguida por uma aplicação lógica dos ensaios físicos, mecânicos e de desgaste.

As vantagens dos revestimentos duros são as seguintes:

- Aumento da resistência aos vários tipos de desgaste e/ou corrosão quando necessário.
- Aplicação em campo.
- Uso econômico de ligas caras.
- Aplicação de uma camada superficial dura para resistir ao desgaste sobre um substrato barato.

Outras considerações são importantes no uso dos revestimentos duros tais como a geometria da peça, o custo do material e do trabalho, técnicas para

prevenção de trinca e minimização de distorções e a qualidade do revestimento. A qualidade desejada pode variar dependendo da aplicação particular do revestimento.

II.2.2- Revestimento Duro Para Resistir à Abrasão

O desgaste abrasivo é a mais freqüente razão para a aplicação do revestimento duro, que deve ser selecionado após uma análise minuciosa das condições que estão causando o desgaste. Esta análise é dominada pelos fatores de abrasão e impacto, mas calor, corrosão e fadiga podem estar envolvidos. Há uma aproximada correlação entre a dureza e a resistência à abrasão, mas não se deve usar somente a dureza e o teor de liga como critério para a resistência à abrasão ^[25].

A melhor aproximação na seleção do material depositado é identificar certos fatores importantes e então compará-los com as várias ligas para deposição com base na resposta a esses fatores sob condições controladas. Os fatores a serem identificados são:

- O tipo de abrasivo a ser encontrado e suas características (dureza, angularidade, tamanho e forma da partícula).
- O nível de impacto a ser encontrado.
- A quantidade de apoio fornecido ao depósito.
- Os níveis de solicitações envolvidos.
- A natureza das solicitações (tensão, compressão e cisalhamento).
- A temperatura de operação.
- Condições ambientais.

Os dados usados para avaliação dos resultados em serviço ou em laboratório devem ser examinados criteriosamente. Os ensaios devem reproduzir ou assemelhar-se às condições de serviço.

II.2.3- Processos de Aplicação do Revestimento Duro por Arco Elétrico

Os processos utilizados para a aplicação de revestimentos duros, como citados anteriormente são: soldagem, brasagem e aspersão térmica. Os processos de soldagem podem ser por arco elétrico ou por chama gasosa e os processos por aspersão podem ser por chama, arco elétrico, plasma e detonação. O processo de soldagem por chama envolve menores aportes de calor, menores taxas de

resfriamento, menor diluição do metal de base, tem equipamento portátil e relativamente barato. A soldagem por arco elétrico é mais rápida, tem maiores taxas de deposição, no geral mais barata e requer menor habilidade do operador.

Os processos por arco elétrico podem ser manuais, semiautomáticos, automáticos e mecânicos, e os mais utilizados para revestimento são:

- Soldagem por arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW) – o arco elétrico é formado entre o eletrodo de tungstênio (não consumível) e o metal base, sendo ambos protegidos por gás hélio ou argônio ou uma mistura dos dois. O material para revestimento é introduzido na forma de vareta ou arame que se funde no arco. Os revestimentos utilizados são: aços alta-liga, aços inoxidáveis ao cromo, níquel e suas ligas, cobre e suas ligas e cobalto e suas ligas. Este processo possui baixa taxa de deposição e diluição e é utilizado para peças com pequenas espessuras com alta qualidade.
- Soldagem por arco com eletrodo consumível e proteção gasosa (GMAW e FCAW) - o arco elétrico é formado entre o metal base e o eletrodo (consumível), sendo ambos protegidos por um gás (argônio, dióxido de carbono, hélio ou em várias misturas ou com oxigênio). O material para revestimento é introduzido na forma de eletrodos nus ou arames tubulares. Os revestimentos utilizados são: aços alta-liga, aços inoxidáveis ao cromo, níquel e suas ligas, cobre e suas ligas, titânio e suas ligas e cobalto e suas ligas. Este processo possui alta diluição.
- Soldagem por arco com eletrodo revestido (SMAW) – o arco elétrico é formado entre o metal de base e o eletrodo (consumível). O material para revestimento é introduzido na forma de varetas revestidas. Uma vantagem é a ampla variedade de varetas que podem ser produzidas para aplicações específicas.
- Soldagem por arco submerso (SAW) – este processo será descrito detalhadamente a seguir.

Segundo Noble ^[26] a escolha do processo de soldagem é normalmente feita com base na geometria da peça e na taxa de deposição desejada mais do que na microestrutura e na composição química desejadas.

II.3 - Processo de Soldagem por Arco Submerso

II.3.1 - Características Gerais

A soldagem por arco submerso une metais por fusão através de um arco elétrico (ou arcos) mantido entre o eletrodo (ou eletrodos) metálico e o metal a ser soldado. Este arco é protegido por uma cobertura de um material granular, fusível, denominado fluxo, colocado sobre a área a ser soldada. A Figura 12 mostra um esquema simplificado deste processo ^[25].

Figura 12 - Esquema do processo de soldagem por arco submerso ^[25].

O arco elétrico funde o metal base, o eletrodo contínuo e o fluxo, este depositado à frente do eletrodo cobrindo o arco elétrico. A poça de solda preenche o chanfro ou reveste o metal base e durante o resfriamento é formada uma escória que protege o cordão da atmosfera e funciona como isolante térmico. Esta escória é removida finalizando o processo.

As fontes de energia para soldagem podem ser do tipo retificador ou gerador à tensão ou corrente constantes e transformador à corrente alternada. A fonte utilizada determina a maioria dos limites dentro dos quais o processo pode operar sendo a maioria das soldagens feitas na faixa de 400 a 1500A.

A soldagem por arco submerso pode ser empregada em:

- Aços carbono (C até 0.29%).
- Aços carbono tratados termicamente.
- Aços baixa liga com σ_e até 690 MPa.

- Aços Cr-Mo (0.5% a 0.9% Cr e 0.5% a 1% Mo).
- Aços inoxidáveis austeníticos Cr-Ni.
- Níquel e suas ligas.

Este processo de soldagem apresenta as seguintes vantagens. [25, 26, 27, 28, 29]

- O processo utiliza as altas correntes que são responsáveis por desenvolverem altas temperaturas. Isto ocorre porque a corrente é aplicada para o eletrodo a uma pequena distância do bico de contato, podendo suportar altas correntes em pequenos diâmetros de eletrodo, resultando em altas densidades de corrente que geram altas taxas de fusão. O fato acima associado a que o fluxo concentra o calor na zona de soldagem faz com que além dos consumíveis fundirem-se rapidamente também ocorre uma penetração profunda no metal base possibilitando altas taxas de deposição e altas velocidades de soldagem.
- Os parâmetros de soldagem podem ser controlados de forma a utilizar amplas faixas de corrente de soldagem, tensão de arco e velocidade de soldagem. Entretanto deve ser escolhida a melhor combinação dos mesmos para produzir adequadas geometrias do cordão e propriedades do metal de solda.
- Durante a soldagem não ocorrem respingos, luminosidade e radiação e assim o operador não necessita utilizar proteção contra a radiação do arco elétrico.
- O fluxo atua como desoxidante removendo os contaminantes da poça de fusão e produz soldas com boas propriedades mecânicas. O fluxo pode adicionar elementos de liga ao metal de solda.
- Os consumíveis para soldagem são em geral de baixo custo quando comparados com outros processos.
- As soldas apresentam alta qualidade e excelente aparência.

A seguir são listados os fatores limitantes deste processo:

- Pela ação da gravidade, para manter o fluxo sobre a área de soldagem, este processo apenas pode ser empregado na posição plana ou horizontal. Torna-se necessário colocar a junta nestas posições para efetuar a soldagem.
- O fluxo é higroscópico podendo assim causar porosidade por contaminar a solda.
- Com o emprego de alta energia de soldagem, usualmente forma-se uma grande poça de fusão, que pode contribuir para a formação de trincas de cratera no início e final da junta. Por isso são colocadas chapas de início e saída da solda, funcionando como uma extensão da junta.
- A escória formada deve ser removida do cordão de solda e em algumas aplicações esta remoção pode ser uma operação difícil.

Este processo é empregado amplamente na indústria de fabricação e algumas aplicações são listadas abaixo:

- Tanques para baixa, média e alta pressões.
- Botijões e cilindros para gases e ar comprimido.
- Oleodutos, aquedutos, minerodutos e tubulações.
- Turbinas elétricas, geradores e comportas.
- Locomotivas, vagões, material ferroviário.
- Grandes estruturas, edifícios, pontes, elevados.
- Caldeiras, equipamentos siderúrgicos e vasos de pressão.
- Plataformas de prospecção e exploração de petróleo.
- Máquinas de mineração, movimentação de cargas.
- Implementos agrícolas e maquinaria de terraplanagem.
- Navios, dragas, motores marítimos.
- Auto peças, rodas, eixos.

Este processo é utilizado também na recuperação de peças:

- Rolos de lingotamento contínuo de laminação.
- Eixos de moenda de usina de açúcar.
- Partes rodantes de tratores.
- Auto peças, girabrequins.

II.3.2- Consumíveis: Eletrodo e Fluxo

Os eletrodos são classificados conforme norma da *American Welding Society* (AWS). São fornecidos como arames sólidos nus e os eletrodos de aço são geralmente cobreados para evitar oxidação e diminuir o desgaste no tubo de contato. As bitolas mais utilizadas estão na faixa de 1.6 a 6.4mm de diâmetro.

Os fluxos são misturas de compostos minerais granulares com várias formulações. Baseado na diferença dos métodos de produção, os tipos de fluxo são: fundidos, aglomerados, ligados e misturados mecanicamente.

A basicidade dos fluxos está relacionada com a facilidade com a qual os óxidos dissociam-se em um cátion metálico e um ânion de oxigênio. Os óxidos dos fluxos que se dissociam facilmente são chamados básicos; os ácidos dissociam-se em pequeno grau e os neutros são intermediários. Importantes também são o tamanho e a distribuição das partículas, que influenciam na alimentação e cobertura do fluxo, no nível de amperagem, na uniformidade e forma do cordão.

O fluxo tem as funções de proteger a poça de fusão da atmosfera cobrindo-a com escória fundida, desoxidar a poça de fusão, modificar a composição, influenciar na forma e nas propriedades mecânicas do cordão de solda.

II.3.3 - Principais Variáveis do Processo

As variáveis mais importantes e seus efeitos sobre a soldagem são: [25, 27, 28]

a) Corrente:

É a mais influente das variáveis porque controla a taxa de deposição, a penetração e a diluição da chapa base. Aumentando-se a corrente, mantendo-se os demais parâmetros constantes, tem-se:

- Maior penetração.
- Maior taxa de deposição.

Correntes excessivamente altas produzem cordões estreitos e altos enquanto que correntes excessivamente baixas produzem arco instável.

Recomenda-se o uso de corrente contínua com polaridade inversa (CC+, eletrodo positivo) para rápida deposição de passes ou penetração total. A corrente contínua com polaridade direta (CC-, eletrodo negativo) oferece maior taxa de deposição em relação àquela com polaridade inversa, porém, com menor penetração. A corrente alternada produz penetração intermediária e reduz o sopro magnético (deflexão do arco devido às forças magnéticas).

b) Tensão do arco:

Determina principalmente a forma da seção transversal do cordão e sua aparência externa. Aumentando-se a tensão, mantendo-se os demais parâmetros constantes, tem-se:

- Cordão mais plano e liso.
- Aumento do consumo de fluxo.
- Redução da porosidade.
- Aumento da absorção dos elementos de liga do fluxo.
- Aumento da sensibilidade às trincas.

Tensões excessivamente altas produzem cordões de forma côncava sujeitos a trincas e dificulta a remoção da escória. Tensões excessivamente baixas produzem cordões altos e estreitos dificultando a remoção da escória nas bordas.

c) Velocidade de Soldagem

Controla o tamanho do cordão e a penetração. Aumentando-se a velocidade, mantendo-se os demais parâmetros constantes, tem-se:

- Diminuição do aporte de calor.
- Menor taxa de deposição.
- Menor penetração.

Velocidades excessivamente altas aumentam a tendência a mordeduras, porosidade e irregularidades do cordão. Velocidades excessivamente baixas produzem cordões convexos sujeitos às trincas, e uma larga poça de fusão que flui ao redor do arco resultando em um cordão rugoso e inclusões de escória.

d) Diâmetro do Eletrodo

Influencia na forma do cordão, na penetração e na taxa de deposição. Aumentando-se o diâmetro do eletrodo, mantendo-se os demais parâmetros constantes, tem-se:

- Aumento da largura do cordão.
- Diminuição da densidade de corrente (A/mm^2).
- Menor penetração.
- Menor taxa de deposição.

e) Extensão do Eletrodo

A extensão do eletrodo é a distância entre o cabeçote e a ponta do eletrodo. A altas densidades de correntes (acima de $125 A/mm^2$) esta distância é aquecida pela resistência à passagem da corrente, portanto quanto maior esta distância, maior o aquecimento e maior a taxa de deposição. Geralmente a extensão do eletrodo é aproximadamente oito vezes o diâmetro do eletrodo.

f) Tipo e Preparação da Junta

Na escolha do tipo de junta deve-se levar em consideração principalmente:

- Espessura da chapa.
- Penetração necessária.
- Tensões e deformações necessárias.

O tipo de junta mais utilizado na soldagem por arco submerso é a de topo com ou sem chanfro. A junta deve estar isenta de óleos, graxas, ferrugem ou qualquer resíduo que possa contaminar a poça de fusão resultando em bolhas, porosidade e inclusões.

Murugan et al.^[30] em estudo das variáveis do processo de soldagem por arco submerso observaram que a penetração do cordão não é afetada significativamente pela voltagem e pela extensão do eletrodo. A penetração e a largura do cordão diminuem com o aumento da velocidade de soldagem e o aumento da tensão diminui o reforço e aumenta a largura do cordão de solda.

Paranhos et al. ^[20] estudaram diferentes revestimentos para o desgaste abrasivo de ligas Fe-C-Cr depositados por arco submerso. Observaram que a tensão do arco mostrou ser um parâmetro de soldagem muito importante, pois seu aumento tem como consequência um incremento nos teores de elementos de liga do metal de solda. Observaram também que diminuindo-se a intensidade de corrente há uma diminuição da quantidade de metal depositado.

Majetich ^[31] estudou o efeito dos parâmetros de soldagem por arco submerso de vários revestimentos de alto cromo na resistência ao desgaste abrasivo. Seus resultados mostraram que a variação dos parâmetros pode ter um forte efeito na dureza, na composição química e na microestrutura dos revestimentos. A interação entre o fluxo e o metal de solda pode ser menor diminuindo-se a voltagem e usando polaridade direta (eletrodo negativo). A otimização das condições de soldagem resulta na melhora das propriedades dos revestimentos e na redução dos custos totais.

Chandel et al. ^[32] utilizaram-se de programas de computador para a otimização de parâmetros de soldagem por arco submerso. Concluíram que o aumento na tensão do arco aumenta a largura e reduz a penetração do cordão. O uso da polaridade direta é indicada para revestimentos onde é necessária uma menor diluição da chapa base. Uma maior taxa de deposição é obtida usando correntes maiores, polaridade direta e maiores extensões do eletrodo.

Tsai et al. ^[33] têm realizado estudos com redes neurais para a otimização dos parâmetros de soldagem por arco submerso em revestimentos duros.

II.3.4 - Controle da Diluição do Metal Base

Provavelmente a maior diferença entre a soldagem para união e a soldagem para deposição seja a diluição que é do maior interesse, preocupação e cuidado na deposição metálica. Do ponto de vista metalúrgico, a composição e as propriedades do depósito são fortemente influenciadas pela porcentagem de diluição do metal base. Devido a isto, o sucesso da técnica utilizada depende da seleção correta do processo, dos consumíveis e dos parâmetros de soldagem para cada situação e componentes específicos ^[34].

É importante conhecer o efeito de cada parâmetro de soldagem por arco na diluição. O controle desses parâmetros no processo de deposição é fundamental para o resultado final. As principais variáveis de soldagem que afetam a diluição do metal base são ^[25].

- a) Amperagem: aumentando-se a amperagem (densidade de corrente) aumenta-se a diluição do metal base. O arco torna-se mais 'espesso' e quente penetrando mais e fundindo mais metal base.
- b) Polaridade: corrente direta (eletrodo negativo) resulta menor penetração e, assim menor diluição do metal base do que a corrente inversa (eletrodo positivo). Corrente alternada resulta numa diluição intermediária.
- c) Diâmetro do eletrodo: eletrodo de menor diâmetro permite utilizar menor amperagem e assim menor a diluição do metal base.
- d) Extensão do eletrodo: uma longa extensão do eletrodo (eletrodos consumíveis) diminui a diluição do metal base pelo aumento da taxa de consumo do eletrodo e pela difusão da energia do arco quando ele atinge o metal base. Inversamente, uma extensão pequena aumenta a diluição, dentro de certos limites.
- e) Espaçamento dos cordões: menor espaçamento (maior sobreposição) reduz a diluição devido a maior refundição do cordão anterior e menor metal base é incorporado na poça de fusão.
- f) Velocidade de soldagem: uma diminuição na velocidade de soldagem aumenta a quantidade de metal depositado e diminui quantidade de metal base fundido, diminuindo a diluição do metal base. Essa redução na diluição é causada pela mudança na forma e espessura do cordão e pelo fato de que a energia do arco é consumida mais na poça do que no metal base.
- g) Oscilação do eletrodo: maior a largura de oscilação do eletrodo reduz a diluição. Cordões retos (*stringer beads*) resultam na máxima diluição. Uma maior frequência de oscilação resulta em menor diluição do metal base.
- h) Posição de soldagem e inclinação: a posição de soldagem na qual a deposição metálica é aplicada tem um importante aspecto na diluição obtida. Dependendo da posição de soldagem ou inclinação, a gravidade será responsável pela posição da poça em relação ao arco. Quanto mais a poça fica à frente ou sob o arco, menor é a penetração no metal base e menor a diluição; assim a poça age como um anteparo absorvendo parte da energia do arco antes de atingir o metal base. Se a poça estiver muito à frente do arco não ocorrerá fusão.
- i) Proteção: o meio protetor, gás ou fluxo, tem um efeito significativo na diluição do metal base. Ele influencia na fluidez e na tensão superficial da poça. Assim ele determina o molhamento do metal de solda no metal base e a ligação das bordas do cordão. O meio protetor também tem um efeito significativo no tipo de corrente que pode ser usado no processo.

j) Metal de adição no depósito: a adição de metal de deposição, além do eletrodo, pode reduzir consideravelmente a diluição. Um metal adicionado separadamente na forma de pó, arame, vareta e/ou fluxo reduz a diluição aumentando a quantidade de metal depositado e reduzindo a quantidade de metal base que é fundido. Isto ocorre porque parte da energia do arco é utilizada para fundir o material adicionado ao invés do metal base.

II.4- Ensaio de Desgaste Abrasivo

Os ensaios laboratoriais são uma ferramenta que o pesquisador se utiliza para simular as condições reais permitindo o estudo dos vários fenômenos físicos, químicos e físico-químicos que envolvem os processos. Assim, alguns ensaios de abrasão têm sido desenvolvidos, porém nem todos são padronizados, com os seguintes objetivos: ^[35].

- Entender o comportamento ao desgaste de uma particular família de materiais.
- Otimizar e/ou selecionar materiais para aplicações específicas.
- Entender os efeitos de certas variáveis em um tipo particular de mecanismo ou processo de desgaste.
- Desenvolver modelos de desgaste de específicos tribossistemas.

O ensaio de abrasão pino sobre lixa e o ensaio roda de borracha são os dois mais comuns e mais utilizados, mas há outros tipos como o de riscamento elementar, britador de mandíbula, moinho de bolas, abrasividade de Bond entre outros encontrados na literatura.

A seguir está descrito o ensaio roda de borracha/areia seca utilizado neste trabalho.

II.4.1- Ensaio de Desgaste Abrasivo Roda de Borracha/Areia Seca

A norma ASTM G 65-94 ^[3] cobre os procedimentos laboratoriais para a determinação da resistência de materiais metálicos à abrasão por riscamento por meio do ensaio da roda de borracha/areia seca. A finalidade é obter dados para produzir uma hierarquia (*ranking*) dos materiais sob condições específicas. Este método cobre cinco procedimentos (de A a E) os quais são apropriados para específicos graus de resistência à abrasão ou espessura do revestimento.

O equipamento deste ensaio está esquematizado na Figura 13. A amostra é desgastada por um areia de composição e granulometria controladas. Este abrasivo é introduzido entre a amostra e a roda de borracha. A amostra é pressionada contra a roda com uma força especificada por meio de braço de alavanca enquanto o fluxo de areia desgasta o corpo de prova. A duração do teste e a força aplicada variam de acordo com o procedimento adotado. As amostras são pesadas antes e depois do teste e a perda de massa é registrada. Essa perda de massa deve ser convertida para perda de volume em milímetros cúbicos devido a grande diferença

de densidade entre os materiais. Assim o registro final é a perda de volume pelo procedimento adotado.

Figura 13 - Esquema do Aparato do Ensaio da Roda de borracha/areia seca ^[3].

Os principais componentes e parâmetros do ensaio são:

- a) roda de borracha: um anel de borracha de clorobutil é modelado sobre o disco metálico. Sua dureza deve estar entre 58 e 62 Shore A e sua superfície deve ser lisa e uniforme.
- b) abrasivo: deve ser areia de quartzo arredondada 50/70. Sua umidade não deve exceder 0,5% do peso. O uso múltiplo da areia pode afetar os resultados e não é recomendado.
- c) fluxo de areia: o fluxo de areia deve ser na forma de uma cortina uniforme e entre uma taxa de 300 a 400 g/min.
- d) motor: a taxa de revolução do motor deve ser de 200 ± 10 rpm e a carga deve se manter constante durante todo o ensaio.
- e) balança: a balança utilizada na pesagem antes e após ensaio deve ter precisão de 0,001g, mas para o procedimento C esta precisão deve ser de 0,0001g.
- f) corpo de prova: a amostra deve ser retangular de 25x76mm e espessura entre 3,2 e 12,7mm e a superfície a ser desgastada estar uniforme e relativamente lisa.
- g) limpeza da amostra: a amostra deve ser limpa e seca antes e após o ensaio.
- j) resultados: os resultados de perda de massa obtidos devem ser convertidos em perda de volume conforme a expressão a seguir (1):

$$Perda \cdot de \cdot volume(mm^3) = \frac{Perda \cdot de \cdot massa(g)}{Densidade(g/cm^3)} \times 1000 \quad (1)$$

Grigoroudis e Stephenson ^[36] em seus estudos confirmaram que este teste é realmente um ensaio conduzido à baixa tensão, ou seja, a partícula abrasiva não quebra ou fratura durante o ensaio.

Xu et al. ^[37] compararam ensaios de laboratório e de campo (chapas revestidas de transportadores de minérios em uma mina do Oeste da Austrália) e concluíram que o ensaio roda de borracha/areia seca fornece o resultado mais próximo em relação ao ensaio realizado em campo na seleção de ferros fundidos brancos. O ensaio da roda de borracha/areia seca foi comparado com ensaio de pino sobre tambor e um teste de impacto.

Swanson ^[38] comparando o teste da roda de borracha/areia seca com testes de campo (sonda com a ponta revestida anexada a um dispositivo fixado em um trator operando em campos do Arizona nos Estados Unidos) em três tipos de aço (1020, 1045, 4340) e liga de alumínio (6061-T6) concluiu que este ensaio simula o desgaste abrasivo dos materiais estudados em solos arenosos.

Stevenson e Hutchings ^[39] utilizaram o ensaio da roda de borracha/areia seca modificado (a amostra na horizontal, a roda abaixo da amostra e anel de borracha de poliuretano) em relação ao normalizado e concluíram que o coeficiente de atrito é independente da velocidade e da carga aplicadas à amostra e também é independente do tipo de borracha (borracha de poliuretano ou borracha de clorobutil) utilizada no ensaio.

Wirojanupatump e Shipway ^[40] compararam o comportamento de aço comum em ensaios da roda de borracha/areia seca (G65), da roda de borracha/areia molhada (G105) e da roda de aço/areia molhada (B611). Concluíram que o desgaste abrasivo é maior para a roda de aço em ambos meios (seco e úmido). Em condições secas, a taxa de desgaste com alumina angular é similar com a roda de borracha ou de aço. Utilizando-se sílica arredondada o desgaste é maior para a roda de aço, pois esta fratura a partícula e a torna angular.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - Soldagem dos Cordões

III.1.1 - Chapa base, arame e fluxos

Neste trabalho foi utilizada uma chapa laminada de aço SAE 1020 produzida pela USIMINAS com dimensões de 310,0 x 120,0 x 25,4mm como metal de base para a deposição do revestimento.

Como consumíveis foram utilizados o arame com especificação AWS EL-12 (Anexo 01 – parte A) com diâmetro nominal de 3,175mm (1/8") e quatro fluxos ligados comerciais denominados neste trabalho como: E (mistura de dois fluxos utilizada na indústria), M, L e R (Anexo 01 – parte B).

III.1.2 - Equipamento de Soldagem

Foi utilizada uma máquina BAMBOZZI modelo TR-3600 do tipo transformador-retificador, com tensão constante, a 100%.

III.1.3 - Procedimento de Soldagem

As chapas foram limpas para retirar graxas e ferrugens e não haver contaminação do cordão de solda. Foram fixadas duas chapas em sequência com grampos para não ocorrer desalinhamento em relação ao carro porta eletrodo.

Para uma menor diluição da chapa base foi utilizada corrente contínua com polaridade direta (CC-). Primeiramente foi feito um cordão central em toda a extensão da chapa, em seguida o cordão lateral esquerdo (em relação ao ponto inicial da solda) e para finalizar a primeira camada, o cordão lateral direito. Assim formou-se a primeira camada com três cordões de solda. A mesma sequência foi repetida para fazer mais três cordões sobre os cordões anteriores formando-se a segunda camada. A Figura 14 mostra um esquema da sequência de passes. A temperatura de interpasse não ultrapassou 250°C.

Figura 14 - Seqüência de soldagem dos cordões

Foram utilizados dois conjuntos de parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 03. O conjunto 02 é utilizado na indústria e o conjunto 01 é uma condição melhorada através de dados da literatura. O aporte de calor foi calculado conforme a equação (2).

$$Ht = \frac{60 \times V \times I}{v} \quad (2)$$

onde:

Ht é o aporte de calor em kJ/cm.

V é a tensão do arco em V.

I é a corrente em A.

v é a velocidade de soldagem em cm/min.

Tabela 03 - Dois conjuntos de parâmetros de soldagem dos cordões de solda.

Parâmetros de soldagem	Conjunto 01	Conjunto 02
Velocidade (cm/min)	55	50
Extensão do eletrodo (mm)	35,0	25,5
Tensão (V)	30	26
Corrente (A)	450	440
Aporte de calor (kJ/cm)	14,7	13,7

Com estes dois conjuntos de parâmetros utilizou-se o arame EL-12 e variou-se o fluxo para todos os cordões de solda. Então foram feitas oito condições distintas que estão mostradas na Tabela 04.

Não foram feitos pré e pós-aquecimento da chapa base e tampouco a secagem dos fluxos reproduzindo assim os procedimentos utilizados na indústria.

Tabela 04 - Condições dos oito cordões de solda

Condição	1E	2E	1M	2M	1L	2L	1R	2R
Conjunto de parâmetros	1	2	1	2	1	2	1	2
Fluxos comerciais	E	E	M	M	L	L	R	R

III.2 - Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram retirados do centro dos cordões de solda na secção longitudinal como mostra a Figura 15. Foram feitos seis corpos de prova conforme a norma ASTM G 65-94 ^[3] de cada condição como mostra a Figura 16. O acabamento final foi feito na retífica. O material restante foi utilizado na análise química do metal de solda, nas micrografias e macrografias. Foram feitos também seis corpos de prova com aço SAE 1020 conforme a norma ASTM G 65-94 ^[3] como mostra a Figura 16, para referência dos resultados obtidos.

Figura 15 - Posicionamento dos corpos de prova em relação aos cordões

Figura 16 – Dimensões do corpo de prova conforme ASTM G65-94 ^[3].

III.3 – Ensaios

III.3.1- Ensaio de Dureza Vickers

O equipamento utilizado para as medidas de dureza foi um durômetro Leco RT-240. As normas utilizadas foram ASTM E 140-95 ^[41], ASTM E 19-94 ^[42] e ASTM

E 92-82 ^[43]. Fez-se cinco medidas da região central do corpo de prova, calculou-se a média e o desvio padrão das cinco medidas. Para realizar essas medidas foram utilizados os corpos de prova dos ensaios de abrasão antes de serem desgastados e foi tomado o cuidado para que essas medidas não prejudicassem a região da superfície dos corpos de prova a ser desgastada.

III.3.2 - Ensaio de Desgaste da Roda de Borracha / Areia Seca

O ensaio de desgaste foi feito em um abrasômetro do tipo Roda de borracha/areia seca do Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística – USP - São Carlos conforme especificações da norma ASTM G65-94 ^[3]. O equipamento utilizado é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Foto do abrasômetro utilizado nos ensaios de desgaste.

O ensaio foi conduzido conforme a norma ASTM G65-94 ^[3] Procedimento A para todos os corpos de prova. Os parâmetros do ensaio estão na Tabela 05. As

amostras foram pesadas antes do ensaio e após o ensaio foram limpas em álcool anidro e secas antes de serem pesadas novamente. Foi utilizada uma balança de precisão para as pesagens das amostras da marca Mettler com capacidade de 160 gramas

A areia utilizada foi monitorada constantemente por meio de microscopia óptica para garantir que a partícula abrasiva estivesse de acordo com a norma. Esse cuidado foi tomado porque neste trabalho a areia foi utilizada duas vezes e devido a isto ela foi sempre peneirada antes de ser colocada no silo do abrasômetro. Foram feitas fotografias da areia antes do ensaio de abrasão e após o término do ensaio de abrasão para avaliação da mesma.

Para o cálculo da perda de volume foi utilizada a densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para as amostras soldadas. Essa densidade foi calculada no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronaves e Automobilística da USP – São Carlos. Para o aço 1020 a densidade tabelada utilizada foi $7,86 \text{ g/cm}^3$. A média e o desvio padrão da perda de volume foram calculados para todas as amostras.

Tabela 05 - Parâmetros do ensaio de desgaste

Areia	50/70
Fluxo de areia	330g/min
Força contra cp	130N
Número de voltas	6000

III.4 - Análise Química dos Cordões de Solda

A análise química dos oito cordões foi feita por espectrometria de plasma com material excedente dos corpos de prova.

III.5 - Análise Metalográfica e Análise Superficial

III.5.1 - Macrografia

A macrografia foi feita somente para os dois conjuntos de parâmetros de soldagem mostrando a diferença na aparência e na forma dos cordões com a mudança dos parâmetros. Fez-se o lixamento das amostras em lixas d'água de 80,

150, 320, 400 e 600. O polimento foi feito em óxido de cromo 10 μ m. Para o ataque usou-se Nital 2%. Fez-se uma foto (3X) para cada um dos dois conjuntos.

III.5.2 - Micrografia

Da extremidade de um corpo de prova de cada condição foi retirado um quadrado de aproximadamente 10,0mm de aresta, em corte transversal, para análise microestrutural. A região não apresentava desgaste nenhum.

Estes quadrados foram embutidos a frio em resina de estireno. Fez-se o lixamento em lixas d'água de 80, 150, 320, 400 e 600. O polimento foi feito primeiramente em óxido de cromo 10 μ m e depois em pasta de diamante 6,0 μ m, 3,0 μ m, 1,0 μ m e 0,25 μ m sequencialmente.

Para revelar a microestrutura as amostras foram atacadas com Nital 2% e foram feitas duas fotos em diferentes aumentos (200 e 1000X) da região central das mesmas.

Essas amostras foram lixadas e polidas novamente na mesma sequência citada anteriormente, retirando-se assim o ataque anterior. Para revelar a presença de austenita retida nas amostras foi feito um pré-ataque com Nital 2% seguido de um tingimento com Klemm I ^[44] e foram feitas fotos (1000X) da região central das mesmas. O Equipamento utilizado para as fotos da microestrutura foi um Microscópio Óptico Metallovert – Variophoto Leica.

III.5.3 – Fotografia do Corpo de Prova Desgastado

Uma foto de um corpo de prova desgastado foi feita para mostrar a aparência da região desgastada e sua localização exata em todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de desgaste.

III.5.4 - Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Para fazer a análise da superfície desgastada foram retirados da região central desgastada de um corpo de prova de cada condição um cubo de aproximadamente 10,0mm de aresta. A limpeza das amostras foi feita em equipamento de ultra-som com álcool isopropílico durante 12 minutos. O equipamento utilizado para as fotos foi um microscópio eletrônico de varredura

DSM - 960. Foram feitas uma foto com aumento de 1000X para cada condição mostrando assim a aparência dos sulcos deixados pelo abrasivo.

III.6 – Análise da Areia

III.6.1 – Granulometria da Areia

Fez-se a análise granulométrica da areia através do peneiramento de 1,0 quilograma da areia utilizada nos ensaios de desgaste e para isto foi utilizada uma balança Oertling com capacidade de 1600 gramas e um peneirador Solotest automático durante 5 minutos.

III.6.2 – Fotografia da Areia

Foram feitas duas fotografias (16X) da areia utilizada nos ensaios. Uma antes dos ensaios e uma após os ensaios para avaliação e demonstração do abrasivo utilizado nos ensaios de desgaste. Para fotografar a areia foram utilizadas lâminas de vidro com uma fina camada de vaselina para a fixação da mesma.

III.7 – Cálculo da Diluição da Chapa Base

A diluição da chapa base é um dado importante nos processos de soldagem para revestimentos, como relatado anteriormente. Para chapas base sem chanfro um esquema do cordão de solda está na Figura 18 para ilustrar como foi feito o cálculo da diluição da chapa base.

Figura 18 – Esquema da diluição da chapa base.

Para o cálculo da diluição da chapa foram utilizadas as macrografias das duas condições de soldagem. Digitalizou-se as duas fotografias e utilizando-se do programa de análise de imagem Mocha, registrou-se cinco medidas das áreas do reforço (A_r) e cinco medidas das áreas da chapa base diluída (A_p). Com a média desses dados calculou-se a diluição da chapa base através da seguinte fórmula (3):

$$D = \frac{A_p}{A_p + A_r} \times 100 \quad (3)$$

onde:

D: diluição da chapa base (%).

A_p : área da chapa base diluída (mm^2).

A_r : área do reforço da solda (mm^2).

IV – RESULTADOS

IV.1 - Análise Química dos Cordões de Solda

A Tabela 06 demonstra o resultado das análises químicas dos principais elementos químicos em porcentagem de peso dos oito cordões de solda.

Tabela 06 - Análise química dos oito cordões de solda.

% peso	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	Ni
1E	96.091	0.2737	0.4340	1.0652	0.0237	1.7420	0.054
2E	96.926	0.2251	0.3714	0.9020	0.0218	1.2521	0.0508
1L	97.020	0.1824	0.3568	1.0996	0.0253	1.0037	0.0498
2L	97.368	0.1637	0.2859	0.9471	0.0219	0.9282	0.0486
1M	96.612	0.1823	0.4768	0.8233	0.0257	1.4787	0.0497
2M	97.315	0.1457	0.3950	0.7384	0.0240	1.0206	0.0489
1R	95.936	0.3819	0.3442	1.1389	0.0251	1.9258	0.0494
2R	96.295	0.2579	0.3397	1.0856	0.0239	1.7418	0.0497

IV.2 - Fotografia do Corpo de Prova

A Figura 19 mostra a aparência de um corpo de prova após o ensaio de desgaste. Podemos observar o alinhamento da roda de borracha em relação ao corpo de prova e a uniformidade dos riscos.

Figura 19 - Fotografia do corpo de prova após o ensaio de desgaste.

IV.3 - Macrografias

Na Figura 20 estão as macrografias da secção transversal da solda de múltiplos passes mostrando os dois conjuntos de parâmetros de soldagem. O conjunto 01, representado pela fotografia (a) mostra cordões um pouco mais largos em relação ao conjunto 02, representado pela fotografia (b) com cordões mais estreitos e mais altos.

(a) Conjunto 01. Cordões mais largos.

(b) Conjunto 02. Cordões mais estreitos e mais altos.

Figura 20 - Macrografias dos dois conjuntos de parâmetros de soldagem.

IV.4 - Resultados do Ensaio de Dureza

A Tabela 07 mostra os resultados do ensaio de dureza Vickers para os oito cordões de solda na região central do corpo de prova. Podemos observar que os cordões da condição 01 apresentaram uma dureza superior em relação aos respectivos cordões da condição 02.

Tabela 07 - Medidas de dureza Vickers na região central dos oito cordões de solda

Cordão	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média $\pm \sigma_{x(n-1)}$
1E	364.8	350.4	356.7	358.5	352.2	356.5 $\pm$ 5.7
2E	327.9	327.0	316.4	317.2	329.7	323.6 $\pm$ 6.3
1M	273.4	261.2	274.8	278.3	286.2	274.8 $\pm$ 9.1
2M	224.4	225.6	226.2	226.8	220.8	224.8 $\pm$ 2.4
1L	264.2	264.8	270.8	270.8	272.0	268.5 $\pm$ 3.7
2L	225.6	227.4	229.2	223.8	227.4	226.7 $\pm$ 2.1
1R	337.8	336.0	349.5	336.0	347.7	341.4 $\pm$ 6.6
2R	266.6	274.1	274.8	271.4	279.0	273.2 $\pm$ 4.6

IV.5 - Micrografias

As Figuras 21, 22, 23 e 24 mostram as microestruturas das regiões centrais dos cordões de solda. Podemos observar as modificações das microestruturas com a mudança dos parâmetros de soldagem e com a variação dos consumíveis.

As Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram a presença da austenita retida (fase branca) em todos os cordões de solda.

(a) 1E

(b) 2E

Figura 21 – Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1E e 2E. (a) martensita de agulhas e (b) martensita revenida com ferrita (branca).

(c) 1M

(d) 2M

Figura 22 – Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1M e 2M. (c) martensita revenida com ferrita (branca). (d) martensita revenida com ferrita (branca).

(e) 1L

(f) 2L

Figura 23 – Fotografia das microestruturas dos cordões de solda 1L e 2L. (e) martensita revenida com ferrita (branca). (f) martensita revenida com ferrita (branca).

(g) 1R

(h) 2R

Figura 24 - Fotografias das microestruturas dos cordões de solda 1R e 2R. (g) martensita de agulhas. (h) martensita de agulhas.

(a) 1E

(b) 2E

Figura 25 – Fotos da austenita retida (branca) nas amostras 1E (a) e 2E (b).

(c) 1M

(d) 2M

Figura 26 – Fotos da austenita retida (branca) nas amostras 1M (c) e 2M (d).

(e) 1L

(f) 2L

Figura 27 – Fotos da austenita retida (branca) nas amostras 1L (e) e 2L (f).

(g) 1R

(h) 2R

Figura 28 – Fotos da austenita retida (branca) nas amostras 1R (g) e 2R (h).

IV.6 - Fotografia da Areia

A Figura 29 mostra a areia utilizada no ensaio de abrasão. A fotografia (a) mostra a areia antes do ensaio e a fotografia (b) mostra a areia após o ensaio de abrasão.

Figura 29 - Fotografia da areia utilizada no ensaio de abrasão.

(a) areia antes do ensaio e (b) areia após o ensaio.

IV.7 - Resultados dos Ensaio de Abrasão

As Tabelas 08.1 a 08.9 mostram os resultados dos ensaios de abrasão de todas as amostras dos oito cordões e a amostra padrão. A Tabela 09 mostra o resultado da média com o desvio padrão das medidas das amostras e o coeficiente de variação como requer a norma ASTM G65-94.

Tabela 8.1 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1E.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
1E-1*	155.2740	1550.270	0.2470	31.27
1E-2*	155.7640	155.4950	0.2690	34.05
1E-3*	155.2845	155.0185	0.2660	33.67
1E-4*	154.1580	153.8880	0.2700	34.18
1E-5*	155.7815	155.5350	0.2465	31.20
1E-6*	155.2435	154.9845	0.2590	32.78

Tabela 8.2 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2E.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
2E-1	154.7710	154.4725	0.2985	37.78
2E-2*	155.7645	155.40.70	0.3575	45.25
2E-3	155.7615	155.4595	0.3020	38.23
2E-4*	155.3225	154.9590	0.3635	46.01
2E-5*	155.2035	154.8500	0.3535	44.75
2E-6*	156.0890	155.7345	0.3545	44.87

Tabela 8.3 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1M.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
1M-1*	156.3690	156.0125	0.3565	45.13
1M-2*	156.0170	155.6460	0.3710	46.96
1M-3*	155.7420	155.4220	0.3200	40.51
1M-4*	156.1690	155.8095	0.3595	45.51
1M-5	154.7515	154.4580	0.2935	37.15
1M-6	155.2595	154.6490	0.6105	77.28

Tabela 8.4 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2M.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
2M-1	155.4355	155.1010	0.3345	42.34
2M-2	155.7045	155.0255	0.6790	85.94
2M-3*	157.1045	156.7025	0.4060	51.39
2M-4*	156.7955	156.3970	0.3985	50.44
2M-5*	156.9370	156.5140	0.4230	53.54
2M-6*	157.3540	156.9295	0.4245	53.73

Tabela 8.5 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1L.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
1L-1*	154.9845	154.6340	0.3505	44.37
1L-2*	154.3215	153.9630	0.3585	45.38
1L-3*	156.1715	155.8165	0.3550	44.94
1L-4*	155.4950	155.1510	0.3440	43.54
1L-5*	154.8520	154.5020	0.3500	44.30
1L-6*	155.3310	154.9690	0.3620	45.82

Tabela 8.6 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2L.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
2L-1*	154.1370	153.6575	0.4795	60.70
2L-2*	154.8945	154.4720	0.4225	53.48
2L-3*	156.7890	156.3840	0.4050	51.27
2L-4*	156.3045	155.8350	0.4735	59.94
2L-5*	155.1385	154.7415	0.4435	55.06
2L-6*	156.3345	155.8590	0.4755	60.19

Tabela 8.7 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 1R.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
1R-1*	154.9935	154.7260	0.2675	33.86
1R-2*	154.7560	154.5110	0.2450	31.65
1R-3*	154.0660	153.7815	0.2845	36.01
1R-4*	154.6535	154.3935	0.2600	32.91
1R-5*	154.1745	153.8805	0.2940	37.22
1R-6*	156.3020	156.0300	0.2720	34.43

Tabela 8.8 - Resultados dos ensaios de abrasão do cordão 2R.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
2R-1	156.4460	156.0735	0.3725	47.15
2R-2*	156.7270	156.4230	0.3040	38.48
2R-3*	157.3185	157.0345	0.2840	35.95
2R-4*	157.3135	157.0345	0.2760	35.25
2R-5*	157.2140	156.9380	0.2760	34.94
2R-6*	156.0450	155.7615	0.2835	35.89

Tabela 8.9 – Resultados dos ensaios de abrasão da amostra P.

(* amostra utilizada no cálculo do desgaste)

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
P-1*	151.7180	151.1760	0.5340	67.94
P-2*	152.0000	151.4790	0.5210	66.28
P-3*	151.6525	151.1000	0.5525	70.29
P-4*	152.2210	151.6600	0.5610	71.37
P-5*	153.9800	153.4370	0.5430	69.08
P-6*	152.2140	151.6725	0.5415	68.89

Tabela 09 - Resultados do ensaio de abrasão mostrando o coeficiente de variação, a média e o desvio padrão das amostras 1E, 2E, 1M, 2M, 1L, 2L, 1R, 2R e P.

Cordões	Coeficiente de Variação (v)	Média $\pm \sigma_{x(n-1)}$ (mm ³)
1E	3.59	33.7 $\pm$ 1.35
2E	1.35	45.2 $\pm$ 0.75
1M	7.03	44.5 $\pm$ 2.79
2M	3.06	52.3 $\pm$ 1.62
1L	2.01	45.1 $\pm$ 0.82
2L	6.55	57.2 $\pm$ 4.03
1R	6.40	33.2 $\pm$ 2.03
2R	4.22	35.5 $\pm$ 1.40
P	2.91	68.9 $\pm$ 1.78

IV.8 - Microscopia Eletrônica de Varredura das Regiões Desgastadas

As Figuras 30, 31, 32 e 33 mostram as fotografias da microscopia eletrônica de varredura das regiões desgastadas de um corpo de prova de cada uma das oito condições de soldagem. Podemos observar que ocorreu microssulcamento como principal micromecanismo de remoção de material.

(a) 1E

(b) 2E

Figura 30 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1E e 2E. Observamos microssulcamento como mecanismo predominante e aparecem pites (flechas).

(c) 1M

(d) 2M

Figura 31 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1M e 2M. Observamos microssulcamento como mecanismo predominante e aparecem pites (flechas).

(e) 1L

(f) 2L

Figura 32 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1L e 2L. Observamos microssulcamento como mecanismo predominante e aparecem pites (flechas).

(g) 1R

(h) 2R

Figura 33 – Fotografias da microscopia eletrônica de varredura da região desgastada das amostras 1R e 2R. Observamos microssulcamento como mecanismo predominante e aparecem pites (flechas).

IV.9 - Resultados do Cálculo da Diluição da Chapa Base

As Tabelas 10 e 11 mostram as medidas das áreas do reforço (A_r) e as medidas das áreas da chapa diluída (A_p) com a média e o desvio padrão. A Tabela 12 mostra o resultado da diluição da chapa base para cada conjunto.

Tabela 10 – Cinco medidas das áreas do reforço (A_r) para cada conjunto.

	A_{r1}	A_{r2}	A_{r3}	A_{r4}	A_{r5}	Média $\pm \sigma_{x(n-1)}$
Conjunto 01	228,0	227,22	228,17	230,89	227,72	228,40 $\pm 1,44$
Conjunto 02	307,68	305,52	303,92	306,04	306,32	305,90 $\pm 1,36$

Tabela 11 – Cinco medidas das áreas da chapa diluída (A_p) para cada conjunto.

	A_{p1}	A_{p2}	A_{p3}	A_{p4}	A_{p5}	Média $\pm \sigma_{x(n-1)}$
Conjunto 01	38,14	37,19	39,03	37,19	38,31	37,97 $\pm 0,79$
Conjunto 02	45,4	46,2	46,52	44,96	48,8	46,36 $\pm 1,49$

Tabela 12 – Resultado do cálculo da diluição para cada conjunto.

	Diluição (%)
Conjunto 01	14,2
Conjunto 02	13,2

IV.10 – Granulometria da Areia

A Tabela 13 mostra o resultado do levantamento da granulometria da areia utilizada no ensaio de desgaste. Houve uma perda de 0,15% durante o peneiramento.

Tabela 13 – Granulometria da areia

Malha	Abertura da malha (mm)	% de areia retida
50	0,297	0,51
70	0,210	87,15
prato	-	12,19

V – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

V.1 - Análise Química dos Cordões de Solda

Podemos observar através da Tabela 06 que o conjunto de soldagem 01 foi responsável por uma maior absorção dos elementos de liga dos fluxos, pois o eletrodo e a chapa base são neutros, ou seja, não contribuem para adição de elementos de liga no cordão de solda. Ocorreu aumento dos teores de carbono, manganês e cromo principalmente, independentemente do fluxo utilizado. Esse aumento ocorre devido o aumento da tensão do arco elétrico que provoca uma maior absorção dos elementos de liga do fluxo. Essa variação do teor dos elementos de liga foi responsável pela microestrutura final diferenciada das amostras. O cromo e o manganês aumentaram a temperabilidade dos cordões de solda, ou seja, a curva de transformação foi deslocada para a direita resultando em uma microestrutura predominantemente martensítica.

O uso dos fluxos E e R resultou no aumento dos teores de C, Cr e Mn que foi responsável pela microestrutura diferenciada desses cordões de solda em relação aos demais. Os teores de cromo, manganês e carbono estão maiores nas amostras 1E, 1R e 2R que apresentaram uma microestrutura final de martensita de agulhas e são as amostras que apresentaram um melhor desempenho nos ensaios de desgaste abrasivo à baixa tensão em relação às demais amostras.

V.2 - Macrografia

Conforme a Figura 20 que mostra as macrografias dos dois conjuntos de parâmetros de soldagem, podemos observar que o conjunto 01 resultou em cordões mais largos devido a aumento da extensão do eletrodo e da densidade de corrente que aumentam a taxa de deposição produzindo cordões mais largos em relação ao conjunto 02. O aumento da tensão do arco colaborou também para obtenção de cordões mais planos para o conjunto 01.

V.3 - Ensaio de Dureza

Através da Figura 34 podemos observar que o conjunto 01 proporcionou aumento de dureza para todos os fluxos em relação ao conjunto 02. Esse aumento

da dureza é resultado da maior absorção dos elementos de liga desse conjunto em relação ao conjunto 02. Esse aumento foi mais pronunciado para as amostras 1R em relação à 2R e 1M em relação à 2M.

A Figura 35 mostra como a dureza comporta-se com o teor de carbono das amostras. Podemos observar que não há uma relação direta entre dureza e porcentagem de carbono.

Figura 34 – Dureza dos oito cordões de solda.

Figura 35 – Dureza em função do teor de carbono das amostras.

V.4 - Corpo de Prova

Através da Figura 19 podemos verificar que a região desgastada apresenta uniformidade dos riscos, ou seja, riscos paralelos entre si e paralelos em relação ao corpo de prova. Esta região está centralizada no corpo de prova indicando um alinhamento correto do anel de borracha em relação ao corpo de prova como requer a norma do ensaio. O aspecto dessa região está em conformidade com o exigido pela norma de conduta desse ensaio ^[3].

O equipamento utilizado nesse ensaio de desgaste roda de borracha/areia seca já foi utilizado em outros trabalhos ^[45] apresentando excelentes resultados e esses sempre de acordo com a norma ASTM G65-94 ^[3].

V.5 - Micrografias

Através da Figura 21 podemos observar que a microestrutura na amostra 1E é predominante de agulhas de martensita enquanto que a amostra 2E apresenta predominantemente martensita revenida. As amostras 1M e 1L apresentam martensita revenida mais refinada em relação às amostras 2M e 2L respectivamente e também regiões de ferrita (regiões brancas da foto) como mostram as Figuras 22 e 23. As amostras 1R e 2R apresentam uma matriz martensítica de agulhas sendo que 1R está mais refinada como mostra a Figura 24. Essas microestruturas são resultantes da composição química dos cordões e dos ciclos térmicos que ocorreram durante o processo de soldagem dos cordões.

Podemos observar através das Figuras 25, 26, 27 e 28 a presença de austenita retida (pequenas regiões brancas da foto) que aparece entre as agulhas da martensita ou dispersa na martensita revenida. O efeito da austenita retida tem sido relatado, como citado anteriormente, como benéfico para o desgaste abrasivo apesar do seu efeito não estar completamente esclarecido. No presente trabalho não foi investigado o efeito desta microfase sobre o desgaste abrasivo. Este estudo requer uma análise minuciosa desta microfase, pois ela pode conter martensita em seu interior formando o constituinte denominado AM (austenita-martensita) ^[46].

V.6 - Areia

A Figura 29 mostra que a areia utilizada não sofreu desgaste e não sofreu fraturas durante o ensaio de abrasão e está dentro das especificações da norma ^[3]. Esta areia foi reutilizada aproximadamente duas vezes neste trabalho e devido a isto ela foi peneirada sempre antes de ser colocada no silo do equipamento de abrasão.

V.7 - Ensaio de Abrasão

Dos resultados do ensaio de abrasão das amostras 2E (Tabela 8.2), 1M (Tabela 8.3), 2M (Tabela 8.4) e 2R (Tabela 8.8) não foram todos os resultados dos seis corpos de prova obtidos utilizados no cálculo final da média da perda de volume porque alguns apresentaram valores completamente diferentes dos outros resultados. Nos corpos de prova que não foram utilizados no cálculo da perda de volume foi observado que o desgaste não estava uniforme nos corpos de prova como requer a norma para validar o ensaio de desgaste. Por isso foram descartados alguns resultados (2E-1 e 2E-3; 1M-5 e 1M-6; 2M-1 e 2M-2; 2R-1) para o cálculo final da média da perda de volume. Em todas as vezes que os corpos de prova apresentaram esse problema o anel de borracha do equipamento foi trocado por um novo, pois se observou que o anel apresentava partes descoladas da roda de aço. A troca do anel garantiu a continuidade dos ensaios seguintes conforme a norma.

A Figura 36 mostra a perda de volume de cada amostra e do metal base e através dele podemos observar que as amostras do conjunto 01 apresentaram um melhor resultado comparando-se com as respectivas amostras do conjunto 02. Os melhores resultados são das amostras 1R, 1E e 2R respectivamente. Essas amostras apresentaram as microestruturas de martensita de agulha enquanto que as demais apresentaram martensita revenida como microestrutura predominante. Entre as amostras de martensita revenida, as amostras com microestrutura mais refinada mostraram um desempenho melhor como pudemos observar nas amostras 1M e 1L em relação às amostras 2M e 2L, respectivamente. O metal base P apresentou o pior desempenho em comparação com todos os revestimentos, como esperado. Os revestimentos 1R, 1E e 2R apresentaram praticamente o dobro da resistência ao desgaste abrasivo em relação à amostra P.

Figura 36 – Perda de volume dos oito cordões de solda e do metal base.

A Figura 37 mostra como a perda de volume das amostras comporta-se com a percentagem de carbono. Observamos que com aumento do teor de carbono há uma tendência na perda de volume das amostras diminuir e isto está relacionado com a microestrutura final dos revestimentos.

Figura 37 - Perda de volume das amostras em função do teor de carbono.

A Figura 38 mostra como a perda de volume comportou-se em função da dureza das amostras. Podemos observar que não há uma relação direta entre dureza e resistência à abrasão. A dureza, neste caso, não pode ser referência

como demonstrativo da resistência ao desgaste, pois amostras com durezas equivalentes apresentaram perdas de volume muito distintas.

Figura 38 – Perda de volume em função da dureza das amostras.

V.8 – MEV das Regiões Desgastadas

Através das Figuras 30, 31, 32 e 33 primeiramente podemos observar a uniformidade dos riscos na região desgastada. Observa-se pela aparência que ocorreu o microsulcamento para todas as amostras como micromecanismo predominante de remoção de material. Observa-se também o aparecimento de micropites em todas as amostras, mas em maior quantidade nas amostras 2E, 1M, 2M, 1L e 2L. As amostras que apresentaram os melhores desempenhos no ensaio de desgaste apresentaram micropites em menores quantidades.

V.9 - Diluição da Chapa Base

Através da Tabela 12 podemos observar que a diferença na diluição da chapa base para ambas condições não foi expressiva demonstrando que as duas condições proporcionaram baixa diluição da chapa base. Este baixo valor é devido principalmente à utilização da corrente contínua com polaridade direta (CC-), pois a soldagem por arco submerso pode resultar em uma diluição da chapa base de até 60%, dependendo dos parâmetros de soldagem. Isto proporcionou também que os cordões de solda fossem constituídos principalmente de fluxo e arame, ou seja, uma microestrutura diferenciada com apenas duas camadas de cordões de solda.

VI - CONCLUSÕES

Analizando os resultados obtidos neste trabalho podemos estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) O conjunto 01 de soldagem (velocidade de 55cm/min, extensão do eletrodo de 35,0mm, tensão de 30V, corrente de 450A) resultou na melhora do desempenho em relação ao desgaste abrasivo a baixa tensão comparativamente ao conjunto 02 (velocidade de 50cm/min, extensão do eletrodo de 25,5mm, tensão de 26V, corrente de 440A) para todos os fluxos utilizados.
- 2) Os revestimentos feitos com os fluxos E e R (1E, 1R e 2R) foram os que apresentaram as menores perdas de volume em comparação com os revestimentos feitos com os fluxos M e L.
- 3) A martensita de agulhas presente nas amostras 1E, 1R e 2R foi a microestrutura com a qual obteve-se os melhores resultados de desgaste abrasivo a baixa tensão.
- 4) A microestrutura mostrou ser fator determinante nesses resultados de desgaste abrasivo a baixa tensão.
- 5) É possível obter melhores produtos na área de revestimento contra o desgaste abrasivo com pequenas e simples modificações nos parâmetros de soldagem e com a utilização de fluxos comerciais, o que está ao alcance de qualquer indústria nacional de recuperação de peças rodantes de tratores.
- 6) O mecanismo de remoção de material predominante nesses revestimentos sob desgaste abrasivo foi o microsulcamento.

VII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abriu espaço para mais algumas idéias e sugestões de trabalhos como:

- 1) Fazer uma avaliação dos detritos do ensaio de abrasão para melhor verificação dos micromecanismos de desgaste atuantes.
- 2) Verificar o comportamento destes revestimentos sob condições diferentes como em ensaios de desgaste a alta-tensão do tipo pino-sobre-lixo.
- 3) Realizar testes de campo para verificação do desempenho em serviço destes revestimentos.

VIII – ANEXO 01

Parte A

O arame utilizado na soldagem foi o EL – 12. O E significa que é um eletrodo, o L significa que tem baixo teor de manganês (0,25 – 0,60%) e o número 12 significa que tem médio teor de carbono.

A composição média do EL – 12 é dada a seguir:

0,04 – 0,14% C

0,25 – 0,60% Mn

0,1% Si

0,03% P

0,03% S

0,35% Cu

0,50 outros

Fe balanceado.

Parte B

Os fluxos utilizados neste trabalho foram os listados a seguir:

- Fluxo E: fluxo ESAB. Mistura de uma parte de 10.60R e duas partes de 10.35.
- Fluxo M: fluxo Carbox 35-Mo.
- Fluxo L: fluxo Lincoln H353.
- Fluxo R: fluxo Carbox R-60.

O fluxo E é a mistura utilizada na indústria de recuperação dos “links” dos tratores.

IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zum Gahr, K.H. (1987) *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam, Elsevier.
- [2] Dicionário Aurélio Eletrônico Século XXI Versão 3.0 (1999) – CD-ROM. Editora Fronteira, Novembro.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994) *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus*. G 65-94. In: ANUAL BOOK OF ASTM STANDARD.
- [4] Gates, J.D. (1998) Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. *Wear*, v. 214, p. 139-146.
- [5] Tylczak, J.H. (1992) Abrasive Wear., *Friction, lubrication and wear technology*, In: AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS HANDBOOK, v.18, p. 184-190, ASM International, USA.
- [6] Vetter, A.F.; Swanson P.A. (1984) The measurement of abrasive particle shape and its effect on wear. *ASLE Transactions*, v.28, 2, p.225-230.
- [7] Dube, N.B.; Hutchings I.M. (1999) Influence of particle in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel. *Wear*, v.233-235, p. 246-256.
- [8] Zum Gahr, K. H. (1998) Wear by hard particles. *Tribology International*, v.31, n.10, p. 587-596.
- [9] Misra, A.; Finnie, I. (1982) A review of the abrasive Wear of Metals. *Transactions of the ASME*, v.102, n.2, p.94-101, April.
- [10] Misra, A.; Finnie, I. (1983) An experimental study of three-body abrasive wear. *Wear*, v.85, n.2, p.57-68.
- [11] Dasgupta, R.; Prasad B.K.; Jha, A.K.; Modi, O.P.; Das, S; Yesneswaran, A.H. (1997) Wear characteristics of hardfaced steel in slurry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.7, n.2, p.221-226, April.
- [12] Larsen-Badse, J.; Mathew, K.G. (1969) Influence of structure on the abrasion resistance of a 1040 steel. *Wear*, v.14, p. 199-206.
- [13] Xu, L.; Kennon, N.F. (1991) A study of the abrasive wear of carbon steels. *Wear*, v. 148, p.101-112.
- [14] Das, S.; Prasad, B.K.; Jha, A.K.; Modi O.P.; Yegneswaran, A.H. (1993) Three-body abrasive wear of 0.98% carbon steel. *Wear*, v.162-164, p. 802-810.
- [15] Kotecki, D.J.; Ogborn, J.S. (1995) Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys. *Welding Journal*, n.8, v.74, p.269s-278s. August.

- [16] Yang, G.H.; Garrison W.M. (1989) A comparison of microstructural effects on two-body and three-body abrasive wear. *Wear*, v.129, p. 93-103.
- [17] Prasad B.K.; Prasad S.V. (1991) Abrasion-induced microstructural changes during low stress abrasion of a plain carbon (0.5%) steel. *Wear*, v. 151, n. 1, p. 1-12.
- [18] He, L.; Zhang, C. (1994) An investigation of the role of secondary carbide in martensitic steel during three-body abrasion wear. *Wear*, v.176, n.1, p. 103-109, July.
- [19] Crook, P. Farmer, H.N.; (19--) Friction and wear of hardfacing alloys, p.758-765.
- [20] Paranhos, R.P.R., Mello, R.S.T., Filho, J.C.P. (1997) Soldagem por arco submerso de revestimentos de ligas Fe-C-Cr resistentes do desgaste abrasivo. *Soldagem & Inspeção*, Suplemento Técnico, ano 3, n.7.
- [21] Bálsamo P.S.S.; Gonçalves R.A.; Mello, J.D.B. (1993) Resistência à abrasão de revestimentos de solda utilizadas em manutenção. In: XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Águas de São Pedro, São Paulo outubro, p. 425-438.
- [22] Bálsamo, P.S.S.; Mello, J.D.B.; Scotti, A (1994) Influência da microestrutura na dureza de revestimentos duros soldados da classe Fe-Cr-C. In: XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Contagem- MG.
- [23] Glaeser, W.A. (1---) Friction and wear of carbon and alloy steels p. 702-709.
- [24] Dasgupta, R. Prasad, B.K.; Modi, O. P. Jha, A. K. (1999) A comparison of material removal mechanism under low stress abrasive condition of steel and hardfacing alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.8, n.4, p.437-442.
- [25] American Welding Society (1998), *Materials and Applications- Part 2*, In: Welding Handbook, 8ed., v.4, chapter 7- Surfacing, p.392-436, Miami-Florida.
- [26] Noble D.N.; (1985), Abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits. *Metal Construction*, v. 17, n.9, september.
- [27] American Welding Society (1978), *Welding Process- Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing and Soldering*, In: Welding Handbook, 7ed., v.2, chapter 6- Submerged Arc Welding, p. 190-223, Miami, Flórida.
- [28] Wainer, E.; Brandi S.D.; Mello, F.D.H.; (1992) *Soldagem: processos e metalurgia*, p. 335-358, Edgard Blücher, São Paulo.
- [29] Östgren, L.; (1996) The submerged arc welding process. *Svetsaren- A Welding review publish by the Esab Group*, v.51, n.3, p.3-4.

- [30] Murugan, N.; Parmar R.S.; Sud S.K.; (1993) Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire. *Journal of Materials Preprocessing Technology* , v. 37, p.767-780.
- [31] Majetich, J.C.; (1985) Optimization of Conventional SAW for Severe Abrasion-Wear Hardfacing Application. *Welding Journal* , p.314s-321s, november.
- [32] Chandel, R.S.; Seow H.P.; Cheong F.L. (1997) Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 72, p. 124-128.
- [33] Tsai, H.L.; Tarng, Y.S.; Tseng, C.M. (1996) Optimization of submerged arc welding process parameters in hardfacing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.12, n.6, p.402-406.
- [34] Dasgupta, R.; Prasad, B.K.; Modi, O.P.; Das, S.; Jha, A.K.; Yegneswaran, A.H.; (1997) Surface engineering for improving performance of mining and agricultural implements. *Surface Engineering*, v.13, n.2, p.123-127.
- [35] Blau, P.J.; (1997) Fifty years of research on the wear of metals. *Tribology International*, v. 30, n. 5. p.321-331.
- [36] Grigoroudis, K.; Stephenson, D.J. (1997) Modelling low stress abrasive wear. *Wear*, v. 213, p.103-111.
- [37] Xu, L.; Vose, C.; StJohn, D. (1993) Abrasive wear study of selected white cast irons as linear materials for the mining industry. *Wear*, v.162-164, p.820-832.
- [38] Swanson P.A.; (19__) Comparison of Laboratory and field abrasion tests. p.519-525.
- [39] Stevenson, A.N.J.; Hutchings, I.M. (1996) Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. *Wear*, v.195, p.232-240.
- [40] Wirojanupatump, S.; Shipway, P.H. (2000) Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus. *Wear*, v.239, p.91-101.
- [41] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995) *Standard hardness conversion tables for metals*. E 140-95. In: CD ROM of ASTM.
- [42] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994) *Standard test method for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials*. E18-94. In: CD ROM of ASTM.
- [43] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1982) *Standard test method for Vickers hardness of metallic materials*. E 92-82 (reapproved 1987). In: Annual Book of ASTM Standard, p.260-268.

- [44] Weck, E.; Leistner, E. (1982) Metallographic instructions for colour etching by immersion – Part I: Klemm colour etching. *Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH*, Düsseldorf, p. 28-29.
- [45] Ferrarini, C.F. (1997) *Análise da resistência ao desgaste abrasivo de um revestimento duro obtido pela deposição por soldagem de uma liga a base de ferro*. São Carlos, 155 p. Dissertação (mestrado). Área de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo.
- [46] Rebello, J.M.A.; SAUER, A. (1996) O Constituinte Austenita-Martensita (AM). *Matéria Revista Científica Virtual da Área de Materiais*. Ano 1, n.1 Julho.