

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO CASTOLDI CASOTTI

LUCYANO BUSSULAR DA SILVA

MATHEUS LUBIANA DE SOUZA SARMENGI

RODRIGO BERTAZO CABRAL

**ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO COM
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM A ELETRODO REVESTIDO E ARAME
TUBULAR**

ARACRUZ

2019

EDUARDO CASTOLDI CASOTTI

LUCYANO BUSSULAR DA SILVA

MATHEUS LUBIANA DE SOUZA SARMENGI

RODRIGO BERTAZO CABRAL

**ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO COM
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM A ELETRODO REVESTIDO E ARAME
TUBULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. João Paulo Calixto da Silva

ARACRUZ

2019

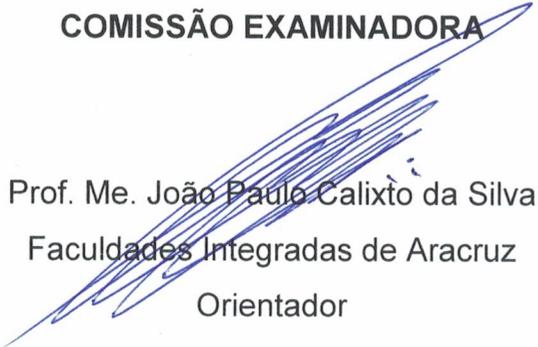
**EDUARDO CASTOLDI CASOTTI
LUCYANO BUSSULAR DA SILVA
MATHEUS LUBIANA DE SOUZA SARMENGI
RODRIGO BERTAZO CABRAL**

**ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO COM
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM A ELETRODO REVESTIDO E ARAME
TUBULAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica
das Faculdades Integradas de Aracruz, como re-
quisito parcial para a obtenção do título de Ba-
charel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 19 de dezembro de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador



Prof. Me. Vital Pereira Baptista Júnior
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador interno



Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador interno

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que nos concedeu a vida, saúde e todos os| dons necessários para realização deste trabalho; além de sempre nos ajudar a enfrentar nossos desafios do dia a dia.

Às nossas famílias que sempre nos incentivaram e apoiaram.

A FAACZ de modo geral, onde tivemos muitas oportunidades de aprendizado e experiências. Em especial ao coordenador do curso, Harerton Dourado e nosso orientador João Paulo Calixto, que estiveram conosco desde o início. Além de toda estrutura de laboratório, onde fizemos a maior parte do trabalho, e, seus técnicos responsáveis que nos ajudaram a superar os obstáculos.

A equipe da Suzano e VSA Inoxidáveis, que realizaram várias soldas nos corpos de prova, até obtermos os parâmetros ideais.

E a todas pessoas que estiveram conosco nesse período que, de alguma forma, nos ajudaram e incentivaram a chegarmos até aqui.

RESUMO

Esse trabalho compara a perda de massa de revestimento duro aplicado pelo processo de soldagem por eletrodo revestido com arame tubular, a fim de aumentar a vida útil de alguns equipamentos, tendo em vista que o desgaste é um desafio significativo de nível mundial em variados processos industriais. Para se realizar os testes de perda de massa, foram aplicados cordões de solda sobrepostos de eletrodo revestido XHD 6710 e arame tubular AN 3965 na superfície dos corpos de prova de aço carbono que aderiram completamente os cordões de solda, os parâmetros de soldagem utilizados proporcionaram um valor de *heat input* (aporte térmico) condizente para os dois procedimentos, o que possibilitou a comparação. O equipamento utilizado para realizar os testes foi a roda de borracha nos parâmetros indicados pela norma ASTM G65 que possibilitou a medição da perda de massa por desgaste abrasivo a baixa tensão. O eletrodo revestido apresentou maior resistência ao desgaste, devido à presença de carbonetos primários na microestrutura dos cordões de solda, os mesmos não foram encontrados quando analisada a microestrutura dos cordões de arame tubular.

Palavras-chave: Eletrodo revestido, arame tubular, revestimento duro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de sistemas tribológicos a) Abrasão a dois corpos b) A três corpos.	15
Figura 2 - Ilustração esquemática dos principais mecanismos de desgaste abrasivo: a) e b) Microsulcamento. c) Microcorte. d) Microtrincamento.....	16
Figura 3 - Esquema de um britador de mandíbulas para ensaio de abrasão por goivagem.....	17
Figura 4 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão.	18
Figura 5 - Representação esquemática de uma máquina de ensaio a pino sobre disco.	19
Figura 6 - Equipamento de desgaste por abrasão em ambientes secos ou em condições molhadas.....	21
Figura 7 - Representação esquemática do abrasômetro roda de borracha.	22
Figura 8- Velocidade de desgaste em função da razão entre durezas.	25
Figura 9 - Geometria e angulosidade e sua influência no desgaste abrasivo.	27
Figura 10 - Eletrodo Revestido XHD 6710.	35
Figura 11 - Areia de sílica AFS 50/70.....	36
Figura 12 - Fonte inversora Lincoln Electric.	37
Figura 13 - Fonte inversora Multiprocesso.	38
Figura 14 -Equipamento Roda de Borracha.	38
Figura 15 - Sistema de peneiramento.	39
Figura 16 - Comprimento do corpo de prova.....	42
Figura 17 - Largura do corpo de prova.....	42
Figura 18 - Espessura do corpo de prova.	43
Figura 19 - Execução do ensaio com Roda de Borracha.	44
Figura 20 – Corpo de prova 1 revestido com Eletrodo Revestido XHD 6710 após ensaio de abrasão.....	46
Figura 21 – Corpo de prova 4 revestido com Arame Tubular AN 3965 após ensaio de abrasão.	47
Figura 22 - Corte transversal aos cordões de solda revelando a diluição entre o metal base e o metal de adição do Eletrodo Revestido XHD 6710.....	47

Figura 23 - Corte transversal aos cordões de solda revelando a diluição entre o metal base e o metal de adição do Arame Tubular AN 3965.....	48
Figura 24 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, por Ribeiro (2004), com aumento de 250x.	49
Figura 25 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, com aumento de 250x.	49
Figura 26 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, por Ribeiro (2004), com aumento de 600x.	50
Figura 27 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, com aumento de 400x.....	50
Figura 28 – Microestrutura do revestimento com liga Fe-Cr-Nb-B-C, com aumento de 250x (a) 1000x(b).	51
Figura 29 – Microestrutura do metal depositado por Arame Tubular AN 3965, com aumento de 250x (a) 400x(b).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de ensaios por roda de borracha e areia seca (sílica A50-70).	24
Tabela 2 - Tamanhos de peneiras recomendados pela norma ASTM G 65-16.	24
Tabela 3 – Dureza minerais.	26
Tabela 4 - Classificação dos materiais para revestimentos duros.....	30
Tabela 5 - Composição química do metal de base.	34
Tabela 6 - Propriedades mecânicas nominais do metal de base.	35
Tabela 7 - Composição química e dureza do eletrodo XHD 6710.....	35
Tabela 8 – Composição química do arame tubular AN 3965.	36
Tabela 9 - Parâmetros de soldagem para revestimento duro com eletrodo revestido XHD 6710.....	40
Tabela 10 - Parâmetros de soldagem para revestimento duro arame tubular AN 3965.	41
Tabela 11 - Perda de massa (g) e perda de volume ajustado (mm ³) em função do processo de soldagem.	45
Tabela 12 - Perda de massa associada ao desgaste.....	56
Tabela 13 - Perda de volume ajustada associada ao desgaste.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

AFS – *American Foundry Society*

Ar – Argônio

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS - *American Welding Society*

C – Carbono

Co - Cobalto

Cr – Cromo

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

Fe – Ferro

HRc – Dureza Rockweel C

HV – Dureza Vickers

M7C3 - Formação de Carbonetos

Mo - Molibdênio

N - Newton

Ni – Níquel

ONU – Organizações das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

RC - Dureza Rockwell

SAE – *Society of Automotive Engineers*

XHD – *Xuper High Deposition*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 DESGASTE.....	12
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE.....	13
2.3 MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO	15
2.4 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO	17
2.5 ENSAIO DE ABRASÃO POR GOIVAGEM	17
2.6 ENSAIO DE ABRASÃO E IMPACTO.....	18
2.7 ENSAIO DE ABRASÃO A ALTA TENSÃO	18
2.8 ENSAIO DE ABRASÃO A BAIXA TENSÃO.....	19
2.8.1 Ensaio de abrasão de aço moderado em condições molhadas e secas com equipamento de abrasão com roda de borracha e roda de aço.....	20
2.8.2 Ensaio de abrasão a baixa tensão com equipamento ASTM G65-91, com roda de borracha e areia seca	21
2.8.2.1 Procedimentos recomendados pela norma ASTM G 65-16	23
2.8.2.2 Abrasivo recomendado pela norma ASTM G 65-16	24
2.9 FATORES QUE AFETAM O DESGASTE.....	24
2.9.1 Dureza do abrasivo.....	25
2.9.2 Tamanho do abrasivo.....	26
2.9.3 Geometria das partículas abrasivas.....	27
2.9.4 Fatores externos: Velocidade de deslizamento	27
2.9.5 Fatores externos: Força de compressão entre partículas e superfície	27

2.10 REVESTIMENTO E SOLDAGEM	28
2.10.1 Tipos de ligas de revestimento.....	28
2.10.2 Processos de soldagem para revestimento duro	30
2.11 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NOS REVESTIMENTOS DUROS ...	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 MATERIAIS.....	34
3.1.1 Metal de base	34
3.1.2 Metais de adição	35
3.1.3 Areia.....	36
3.2 EQUIPAMENTOS	37
3.2.1 Fontes de soldagem	37
3.2.2 Equipamentos para ensaio de desgaste.....	38
3.2.3 Sistema de peneiramento da areia	39
3.2.4 Corte, usinagem e pesagem dos corpos de prova	39
3.3 PROCEDIMENTOS	40
3.3.1 Soldagem de revestimentos	40
3.3.2 Ensaio de desgaste abrasivo à baixa tensão	43
3.3.3 Ensaio metalográfico.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 RESISTÊNCIA A ABRASÃO.....	45
4.2 DILUIÇÃO E MICROESTRUTURA	47
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE MASSA	56
APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE VOLUME AJUSTADO	57

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de partes ou peças de equipamentos é um fenômeno que ocorre em todos os campos da indústria, e com o qual a mesma convive há muito tempo (RIBEIRO, 2004). Por isso, aumentar o tempo de vida dos componentes mecânicos é de grande interesse da indústria, principalmente quando se trata de desgaste abrasivo. Dentre os custos de produção, grande parte está relacionada com a manutenção de equipamentos e dos elementos do processo produtivo. Segundo a ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos), em 2012, o custo de manutenção nas indústrias foi de 4,69% do valor do PIB brasileiro, ou seja, cerca de 206,5 milhões de reais que, em que grande parte desse custo está relacionado com o desgaste dos equipamentos.

Segundo a Revista Inovação Eutectic Castolin nº4 (2013, p. 3), “o desgaste custa atualmente a indústria mundial 4 bilhões de dólares (Wear Management – Suíça) em materiais e peças sobressalentes, sendo que neste custo não está incluso perdas de produção, problemas de qualidade, penalidades pela não entrega de produto [...]”.

O desgaste dos materiais traz muitos problemas para a indústria, tais como a deterioração da resistência mecânica e alteração dimensional de componentes da máquina. Esses fatores elevam os custos adicionais, bem como o aumento da carga ambiental, quando os componentes precisam ser substituídos prematuramente (RATIA, 2013 apud MARQUES et. al. 2016).

O desgaste abrasivo atinge vários setores das indústrias como, por exemplo, as indústrias de papel e celulose, mineradoras, metalúrgicas e alguns ramos agroindustriais, como as indústrias sucroalcooleiras. Nas indústrias de papel e celulose, devido às impurezas, como areia e outros elementos não desejáveis que aderem à madeira no processo de colheita, tem-se o desgaste das facas picadoras, assim como na indústria sucroalcooleira em relação à cana-de-açúcar. Essas ferramentas são responsáveis pelo curto ciclo de paradas programadas nas indústrias para sua substituição (LIMA; FERRARESI, 2009).

A resistência ao desgaste abrasivo de ferramentas industriais pode ser aumentada através da soldagem para a aplicação de revestimento duro, utilizando-se diferentes processos, técnicas e consumíveis para a reposição do metal desgastado em serviço (LEITE; MARQUES, 2009; LIMA; FERRARESI, 2009).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar a resistência ao desgaste abrasivo do revestimento por soldagem com o eletrodo revestido (XHD 6710) e com arame tubular (AN 6935).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de resistência a abrasão através do equipamento Roda de Borracha da FAACZ, construída com base na norma ASTM G65-16 para verificar a resistência a abrasão dos revestimentos;
- Analisar a microestrutura dos revestimentos estudados e
- Estudar a relação entre a microestrutura e a resistência a abrasão dos revestimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESGASTE

O fenômeno do desgaste é, de maneira geral, o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras que estão entre ou embutidas em uma ou ambas superfícies em movimento relativo (DIAS; GOMES, 2003 apud RIBEIRO, 2004).

Segundo a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development) da ONU, desgaste pode ser definido como sendo um dano progressivo que envolve a perda de material, perda a qual ocorre na superfície de um componente como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente. Na maioria das aplicações práticas quando ocorre o movimento relativo entre duas superfícies sólidas, este movimento ocorre na presença de lubrificantes (STOETERAU, 2004).

A norma ASTM G40-09 define como: “Perda de massa resultante da interação entre partículas duras que são forçadas contra uma superfície e se movimentam ao longo dela, provocando danos superficiais”.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE

O desgaste é um fenômeno que ocorre por perda de material ou dano à superfície. Diversos autores e normas técnicas enunciam os tipos de desgaste com base nos mecanismos já conhecidos e tudo isso dificulta a discussão dos seus reais problemas. (Ribeiro, 2004) e Budinski e Hardfacing (1987) sugerem a seguinte classificação dos tipos de desgaste: desgaste por abrasão, erosão, adesão ou fricção e fadiga térmica.

O grande número de termos utilizados para descrever os processos de desgaste, dificulta a discussão de problemas relacionados ao mesmo (ZUM GAHR, 1987). A classificação de acordo com a norma DIN 50320 relaciona quatro tipos de desgaste, são eles: o adesivo, por fadiga de superfície, por reação triboquímica e abrasão.

- **Desgaste Adesivo ou por deslizamento:** Ocorre quando as superfícies deslizam uma contra a outra. Altas pressões localizadas nas asperezas causam deformação plástica, adesão e conseqüentemente o crescimento das junções (espécie de soldagem localizada).

- **Desgaste por Fadiga de superfície:** É caracterizado pela formação de trincas sub-superficiais, causadas por carregamentos alternados na superfície sólida.

- **Desgaste por Reação Triboquímica:** É caracterizado pelo contato entre duas superfícies sólidas, que reagem com o meio, que pode ser gasoso ou líquido.
- **Desgaste Abrasivo:** A ser discutido mais detalhadamente, por se tratar do objeto de estudo.

Dentre os principais tipos de desgastes encontrados nas indústrias, o desgaste abrasivo representa 50% dos casos, enquanto o restante é dividido entre desgaste adesivo, erosivo, por fricção e químicos, de acordo com Eyre (1978).

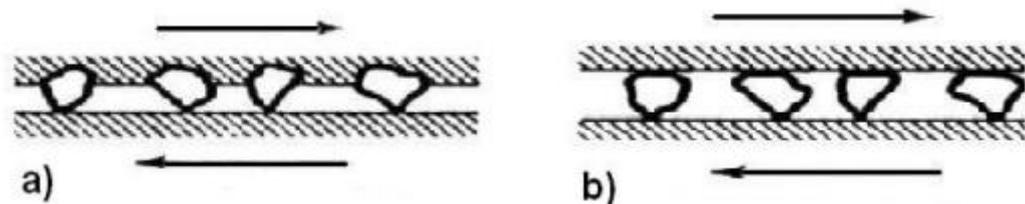
Segundo Ribeiro (2004), o desgaste por abrasão acontece quando partículas de vegetais ou minerais deslizam sobre partes metálicas, acompanhadas de grande pressão ocasionando a retirada de metal por deslocamento ou amassamento. A variação do tamanho das partículas e da pressão empregada determinam a classificação do tipo de abrasão que pode ser:

- **Abrasão por Goivagem** – partículas abrasivas de grandes dimensões com regiões pontiagudas de maior dureza do que o metal em desgaste, de velocidades e pressões variadas e repetitivas. Promovem penetração mais profunda do abrasivo no metal, ocasionando fissuras profundas. Exemplo: caçambas submetidas ao contato com areia, rochas ou esteiras transportadoras de minério bruto.
- **Abrasão por Moagem ou Alta Pressão** – o desgaste ocorre por prensagem, com pressões fortes ou médias de partículas com dimensões médias, menores que 5 cm, ou pequenas, menores que 1 cm, contra o metal. Neste caso, ocorre fragmentação do abrasivo durante o contato e uma penetração ainda maior na superfície desgastada. Ocorre com frequência em implementos de moagem de minérios
- **Abrasão por Riscamento ou a Baixa Pressão** – o desgaste ocorre quando a superfície do material é riscada ou polida, pelo abrasivo. Ocorre frequentemente em componentes de máquinas agrícolas e de escavação, em que, direta ou indiretamente se manuseia terra, areia, dentre outros.

Na ASTM G40 (ASTM, 2001), a definição direta de desgaste abrasivo se dá por “perda progressiva de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem”. A partir desta se entende duas terminologias para este tipo de desgaste classificadas como abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (RIBEIRO, 2004).

Abrasão a dois corpos (Figura 1a) consiste em um sistema onde as partículas duras se localizam rigidamente fixadas no corpo causador do desgaste, entendido como segundo corpo, fazendo com que as mesmas onerem a face do primeiro corpo, causando riscos e perda de massa, enquanto o sistema tribológico a três corpos (Figura 2b), os abrasivos ficam soltos em meio aos corpos em livre rolagem (PINTAÚDE, 2002; HUTCHINGS, 1992).

Figura 1 - Representação de sistemas tribológicos a) Abrasão a dois corpos b) A três corpos.



Fonte: HUTCHINGS (1992).

De acordo com Gates (1998), no procedimento normativo para testes deste tipo de desgaste através da roda de borracha ditado pela ASTM G65, pode-se encontrar os dois tipos de desgaste, pois na medida em que o abrasivo passa entre os dois corpos, o mesmo pode se fixar em um dos corpos e isso configuraria abrasão a dois corpos.

2.3 MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO

Os fenômenos tribológicos no desgaste abrasivo são importantes para identificar os micromecanismos de desgaste (HUTCHINGS, 1992). Segundo Davis (2001, apud SOUZA, 2015), os micromecanismos podem ser dúcteis (microsulcamento e

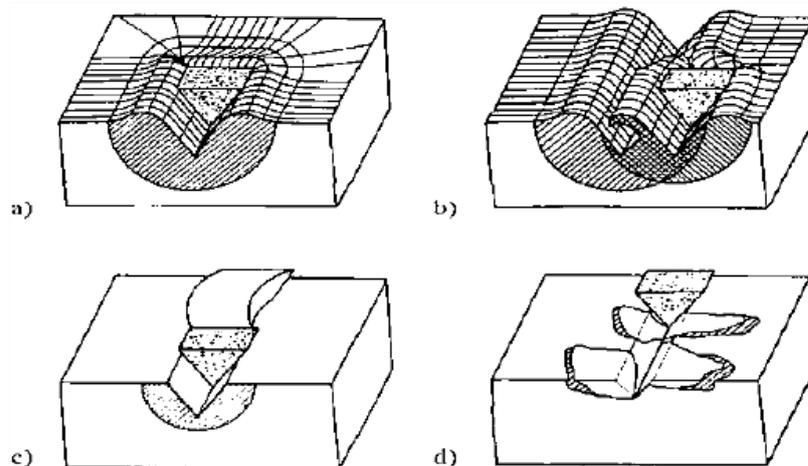
microcorte) ou frágeis (microtrincamento ou lascamento). Esta classificação, segundo SOUZA (2015), é assim descrita:

Microsulcamento: Neste fenômeno ocorre a interação entre a partícula e o abrasivo resultando em deformação dúctil (Figura 2a e Figura 2b), com isso, desloca-se o volume total do sulco para as laterais do mesmo, formando saliências. Nesta etapa não há perda de material efetivo quando analisada individualmente, porém quando há várias partículas agindo desta maneira sobre a superfície, dependendo das condições, pode ocasionar perda mássica

Microcorte: A perda de material se dá pelo corte da superfície pelo abrasivo, como observado na Figura 2c. Em condições perfeitas o volume perdido corresponde ao volume do risco deixado na superfície desgastada.

Microtrincamento: Nesse mecanismo, há o predomínio de condições frágeis de desgaste, a interação entre a partícula e a superfície resulta no destacamento de fragmentos, os quais apresentam dimensões maiores que o risco, pois ocorre propagação de trincas durante o evento (Figura 2d).

Figura 2 - Ilustração esquemática dos principais mecanismos de desgaste abrasivo: a) e b) Microsulcamento. c) Microcorte. d) Microtrincamento.



Fonte: ZUM GAHR (1998, apud SOUZA, 2015).

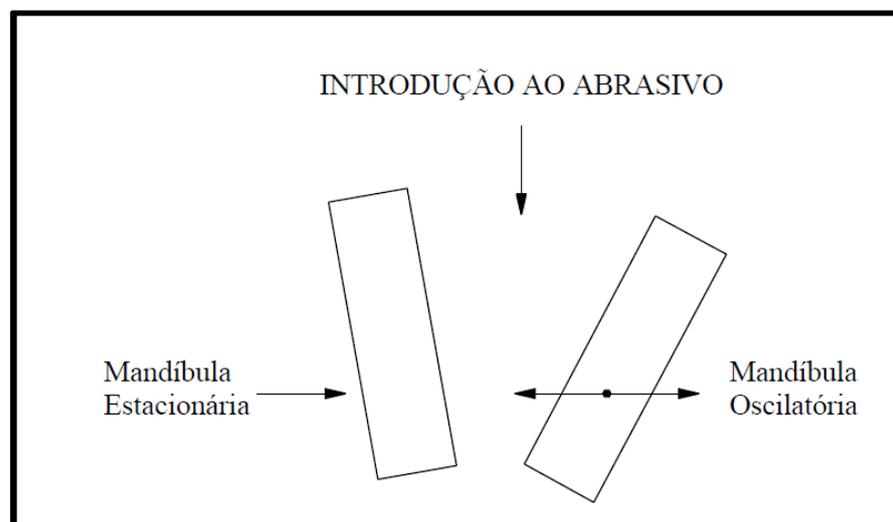
2.4 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

Segundo Noble (1984, apud RIBEIRO, 2004) muitos ensaios foram desenvolvidos para simulação das condições de desgaste semelhantes ou superiores àquelas atuantes nas três formas de abrasão (goivagem, alta tensão e baixa tensão). Muitos destes são normalizados e tem rígidos procedimentos para sua execução.

2.5 ENSAIO DE ABRASÃO POR GOIVAGEM

Segundo Noble (1984, apud RIBEIRO, 2004), esta é a forma de desgaste abrasivo mais difícil de se avaliar. O equipamento mais utilizado para simular este tipo de abrasão é o britador de mandíbulas (Figura 3). Estudos tentam normalizar este ensaio usando uma mandíbula com material padrão e comparando-se a perda de peso da outra mandíbula a ser ensaiada.

Figura 3 - Esquema de um britador de mandíbulas para ensaio de abrasão por goivagem.



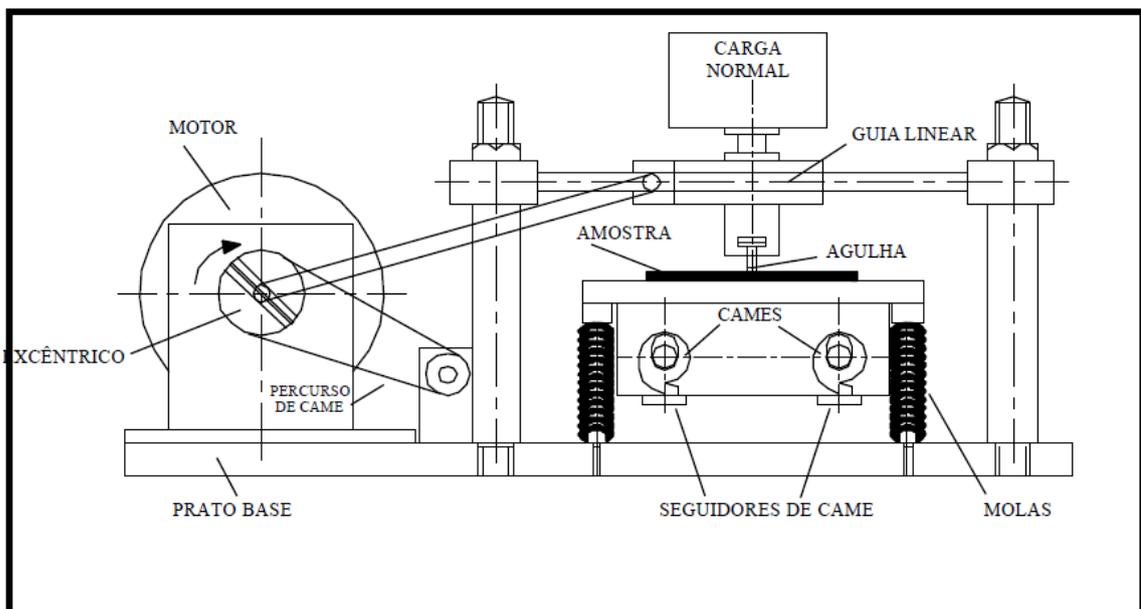
Fonte: NOBLE (1984, apud RIBEIRO, 2004).

2.6 ENSAIO DE ABRASÃO E IMPACTO

O equipamento utilizado para este tipo de pesquisa é apresentado por Kennedy e Hasmi (1996) onde o corpo de prova é fixado junto a mesa de trabalho que está presa a quatro pilares através de guias deslizantes, no ensaio de impacto a mesa se move verticalmente forçando o corpo de prova contra o dispositivo abrasivo, no ensaio de abrasão ocorre movimentação no plano horizontal por parte do dispositivo abrasivo sobre a amostra por meio de um ajustador excêntrico.

Segundo Kennedy e Hasmi (1996), foi desenvolvido um equipamento que combina os efeitos de impacto e abrasão para que pudesse se ensaiar diversos tipos de cenários e materiais, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão.



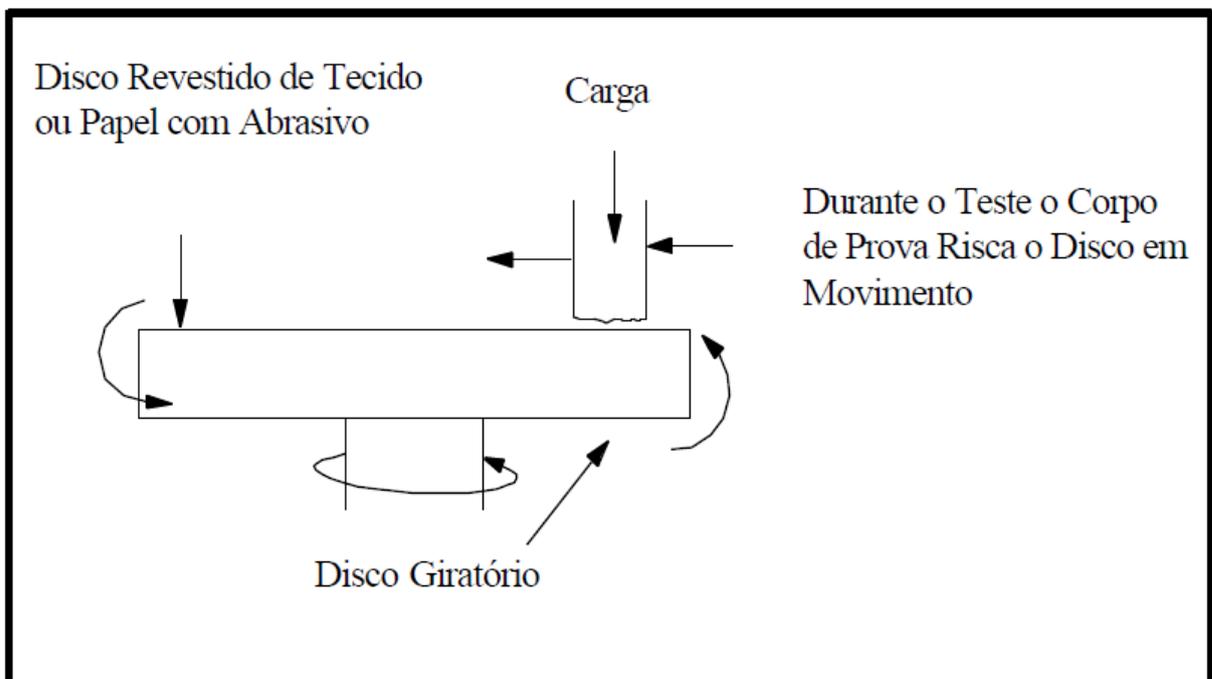
Fonte: KENNEDY; HASHMI (1996 apud RIBEIRO, 2004)

2.7 ENSAIO DE ABRASÃO A ALTA TENSÃO

O equipamento mais utilizado é o de pino sobre disco (NOBLE, 1984, apud RIBEIRO, 2004), onde o pino (objeto a ser ensaiado) risca uma roda abrasiva, sendo que a carga

aplicada ao pino determina o grau de abrasão a altas tensões (Figura 5). Abrasivos de rolagem podem ser adicionados ao sistema, como também podem ser gerados no decorrer do ensaio causando abrasão a três corpos. Um material é usado como base para avaliar a taxa de abrasão realizada.

Figura 5 - Representação esquemática de uma máquina de ensaio a pino sobre disco.



Fonte: RIBEIRO (2004, apud NOBLE, 1984).

2.8 ENSAIO DE ABRASÃO A BAIXA TENSÃO

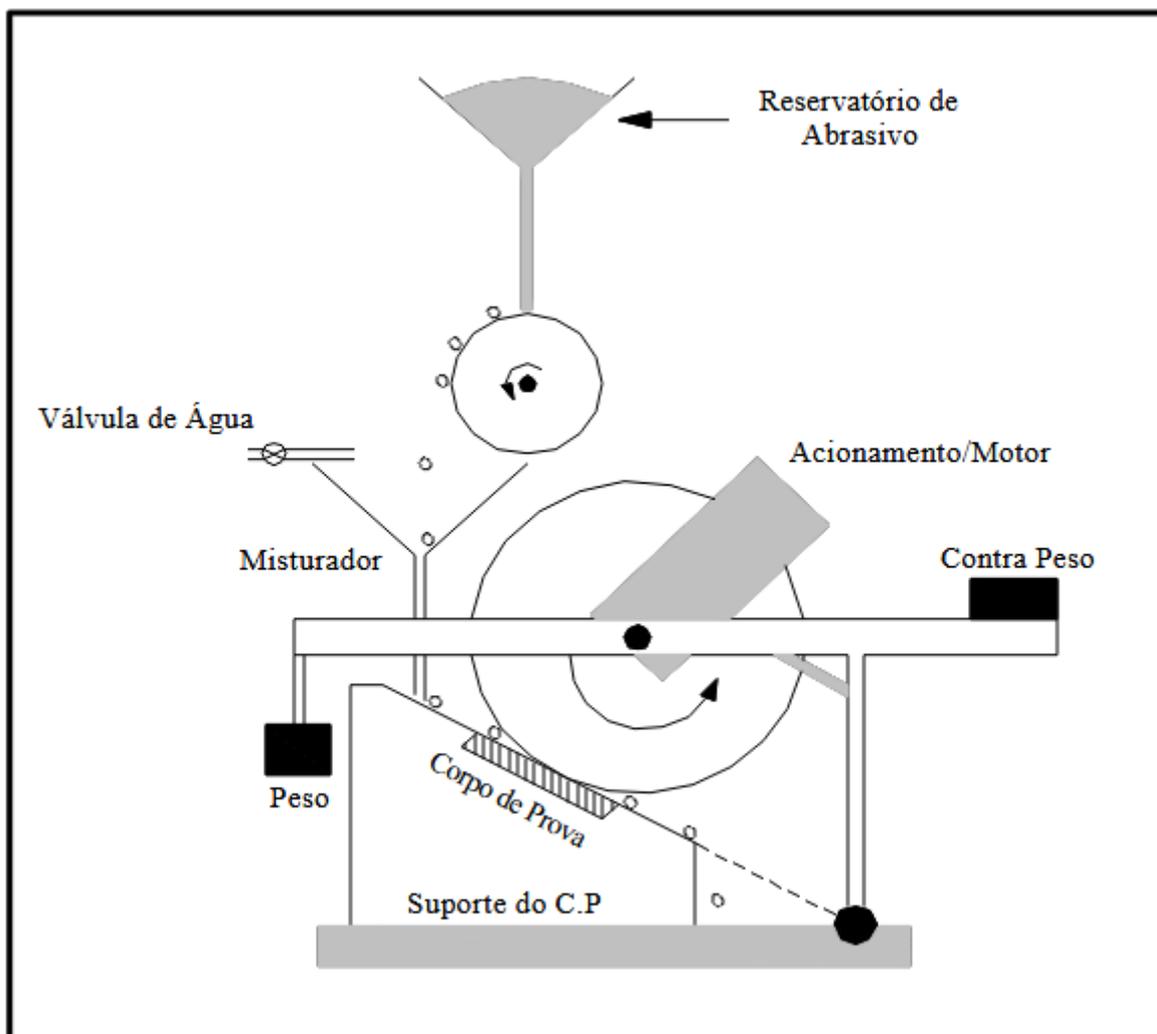
Freqüentemente, mecanismos de ensaio de desgaste são projetados para simular aplicações específicas. A configuração mais comum usada para abrasão a três corpos (corpo de prova, roda giratória e partículas abrasivas), tem seus princípios baseados na ASTM – norma G 65 (ensaio de abrasão por roda de borracha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

máquina de ensaio abrasivo de Brinell, que usou um disco giratório de ferro fundido e um fluxo de areia seca para desgastar os corpos de prova. Haworth comentou que a taxa de abrasão do aparato de Brinell, mudou com o tempo, devido ao tamanho crescente da área de contato entre a roda e o corpo de prova. Para melhorar esse problema Haworth, substituiu a roda de borracha para a roda de ferro. É do trabalho de Brinell e Haworth que todos os ensaios de abrasão fixados pela ASTM são derivados (WIROJANUPATUMP; SHIPWAY, 2000, apud RIBEIRO, 2004).

2.8.1 Ensaio de abrasão de aço moderado em condições molhadas e secas com equipamento de abrasão com roda de borracha e roda de aço.

Este ensaio consiste de uma roda giratória de borracha ou aço (Figura 6), tendo como material abrasivo, grãos de alumina angulares e grãos de sílica arredondados em ambientes secos ou em condições molhada.

Figura 6 - Equipamento de desgaste por abrasão em ambientes secos ou em condições molhadas.



Fonte: WIROJANUPATUMP; SHIPWAY (2000, apud RIBEIRO, 2004).

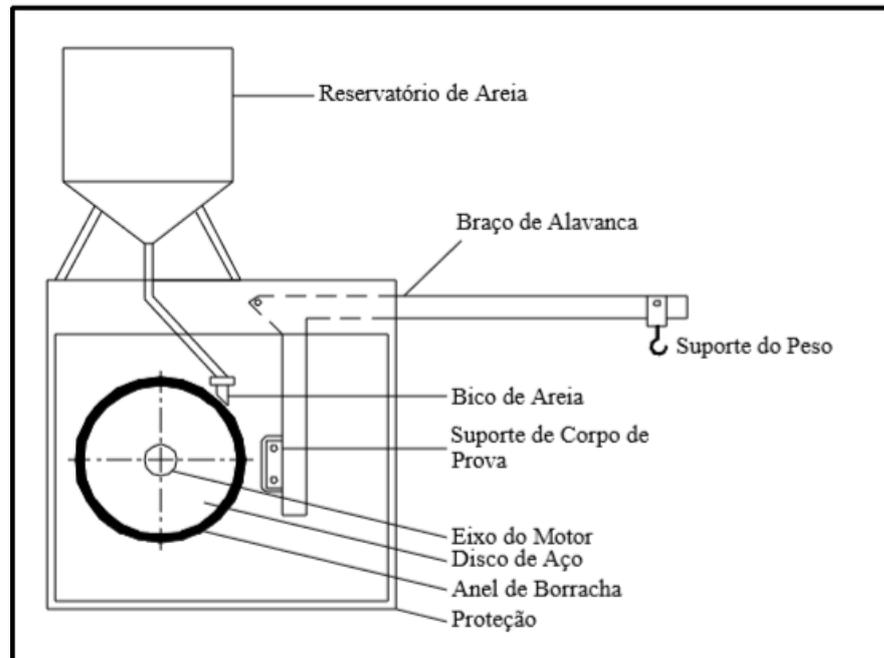
2.8.2 Ensaio de abrasão a baixa tensão com equipamento ASTM G65-91, com roda de borracha e areia seca

Segundo Villabón e Sinatora (2006, p. 1 e 2)

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

A Figura 7 representa esquematicamente o sistema de um abrasômetro do tipo roda de borracha.

Figura 7 - Representação esquemática do abrasômetro roda de borracha.



Fonte: ASTM (1991, apud RIBEIRO, 2004).

O disco de aço é acionado por um motor de corrente contínua. O revestimento é de uma borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore. O corpo de prova é fixado a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força contra o anel de borracha, enquanto isso, o fluxo de abrasivo escoar por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a utilização de abrasivo novo. (ASTM G 65-16, 2001).

A norma ASTM G 65-16 cita a necessidade de converter a massa perdida (gramas) para volume (milímetros cúbicos), devido à diferença de densidades entre os materiais, permitindo assim a comparação entre eles. Essa conversão pode ser obtida pela Equação 1.

$$VP (mm^3) = \frac{Massaperdida (g)}{Densidadedomaterial (g/cm^3)} \times 1000 \quad (1)$$

Onde *VP* simboliza o volume perdido.

É importante destacar que à medida que a roda de borracha vai sendo utilizada o seu diâmetro diminui, portanto, a medida de volume perdido será ligeiramente menor. Neste caso, é importante ajustar a perda de volume perdido através da Equação 2.

$$VPA(mm^3) = VP(mm^3) \times \frac{228,6 (mm)}{Diâm. da roda após uso (mm)} \quad (2)$$

Onde VPA e VP simbolizam o volume perdido ajustado e o volume perdido, respectivamente.

2.8.2.1 Procedimentos recomendados pela norma ASTM G 65-16

O ensaio de abrasão a baixa tensão por roda de borracha e areia seca abrange cinco procedimentos (Tabela 1) para determinar a resistência ao desgaste, cada um com seus devidos parâmetros de testes. São eles:

- **Procedimento A:** É um ensaio relativamente severo, que produz uma grande perda de volume. É particularmente indicado para materiais de média a extrema resistência a abrasão.
- **Procedimento B:** É utilizado quando a perda de volume do procedimento A exceder a 100 mm³. Indicado para materiais de baixa a média resistência abrasiva.
- **Procedimento C:** É uma pequena variação do procedimento A, porém é apropriado para revestimentos finos (pequenas espessuras).
- **Procedimento D:** Este possui uma variação de carga mais leve que a do procedimento A (45N), devido a isso é indicado para materiais de baixa resistência a abrasão.
- **Procedimento E:** É uma pequena variação do procedimento B. Seu uso é indicado para materiais de baixa a média resistência a abrasão.

Tabela 1 - Parâmetros de ensaios por roda de borracha e areia seca (sílica A50-70).

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

FONTE: Adaptado da ASTM G65-16 (2001).

2.8.2.2 Abrasivo recomendado pela norma ASTM G 65-16

Segundo a norma ASTM G 65-16 o uso de diferentes tamanhos de grãos de areia pode afetar os resultados. Com isso, a norma determinou a utilização de grãos de tamanho AFS 50/70, para realizar este controle. A Tabela 2 indica os tamanhos de peneiras:

Tabela 2 - Tamanhos de peneiras recomendados pela norma ASTM G 65-16.

Tamanho da peneira	Abertura	% de retenção
40	425 μm	Nenhum
50	300 μm	5% máx.
70	212 μm	95% min.
100	150 μm	Não passa.

FONTE: Adaptado da ASTM G65-16, 2001.

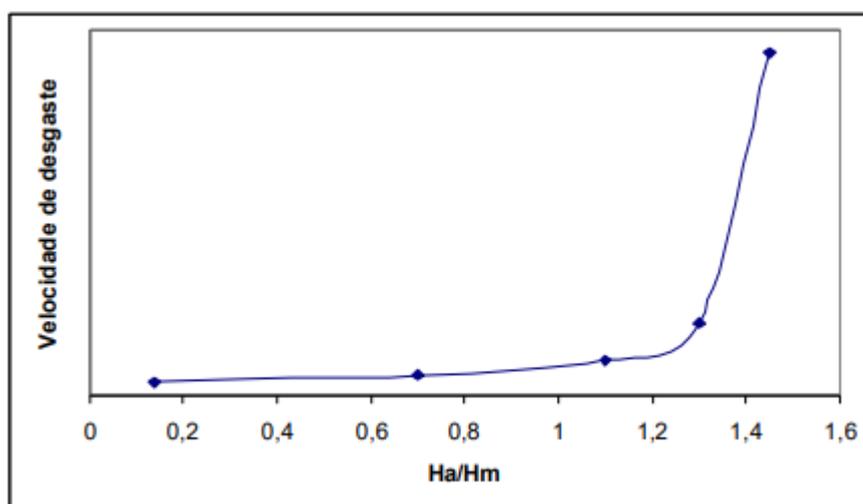
2.9 FATORES QUE AFETAM O DESGASTE

Segundo Ribeiro (2004) os fatores que afetam o desgaste abrasivo são as características de dureza, tamanho e formato, bem como fatores externos que atuam nas superfícies (velocidade de deslizamento e força de compressão do abrasivo).

2.9.1 Dureza do abrasivo

O desgaste do sistema depende do coeficiente de dureza, sendo este, a razão entre a dureza da superfície desgastada e a dureza do abrasivo (RIBEIRO, 2004). Há uma relação entre a velocidade de desgaste com a razão de dureza entre o abrasivo e a superfície metálica (H_a/H_m) (Figura 8), evidenciando que para os valores de H_a/H_m entre 0.7 e 1.1, a velocidade do desgaste é pequena, enquanto entre 1.3 e 1.7 o desgaste é elevado.

Figura 8- Velocidade de desgaste em função da razão entre durezas.



Fonte: WAINER et al., 1992 apud RIBEIRO 2004.

Segundo Ribeiro (2004) estudos mostram que o desgaste abrasivo a baixas tensões é proporcional à dureza da superfície desgastada, embora haja alta concentração volumétrica de carbonetos, fosfetos e outras. A tabela 3 apresenta valores de dureza do abrasivo com superfícies em aços e ferros fundidos.

Tabela 3 – Dureza minerais.

Minerais	Dureza (Hv)	Fases	Dureza (Hv)
Gesso	36	Ferrita	70-200
Calcita	140	Perlita, pura	250-320
Fluorita	190	Perlita, ligada	300-460
Aparita	540	Austenita 12% Mn	170-230
Vidro	500	Austenita, baixa liga	250-350
Feldspato	600-700	Austenita, Fe alto Cr	300-600
Silex	950	Martensita	500-1010
Quartzo	900-1280	Cementita	840-1100
Granada	1350	Carbonetos de Cr (Fe ₃ Cr) ₇ C ₃	1200-1600
Carvão	32	Carbonetos de Mo	1500
Cal	110	Carbonetos de W	2400
Coque	200	Carbonetos de V	2800
Minério de Ferro	470	Carbonetos de Ti	3200
Sinter	770	Carbonetos de Bo	3700
Corindu	1800	Carbonetos de Nb	2400
Diamante	10000	Carbonetos de Fe	1100

Fonte: RIBEIRO, 2004.

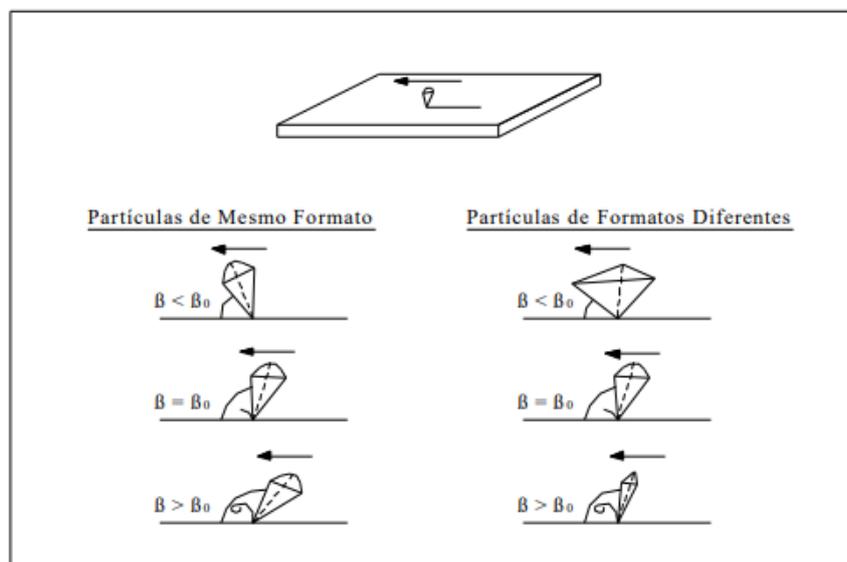
2.9.2 Tamanho do abrasivo

Segundo Ribeiro (2004), observa-se que o volume de material removido cresce com o tamanho da partícula. Hernanes; Nathan; Jones (apud WAINER; BRANDI; MELLO, 1992) evidenciam que há um aumento linear do volume perdido com o aumento do tamanho da partícula até um tamanho crítico, a partir deste, a variação é menos sensível.

2.9.3 Geometria das partículas abrasivas

Os minerais mais duros possuem faces mais agudas e cortantes, enquanto os dúcteis, apresentam faces arredondadas e “moles” (RIBEIRO, 2004). A ação de desgaste causada por uma partícula na superfície depende de sua geometria aguda (pontas), de sua dureza e do ângulo que a mesma atinge a peça (conforme Figura 9).

Figura 9 - Geometria e angulosidade e sua influência no desgaste abrasivo.



Fonte: HERNANDEZ (1997, apud RIBEIRO, 2004).

2.9.4 Fatores externos: Velocidade de deslizamento

Hernanes; Nathan; Jones (apud WAINER; BRANDI; MELLO, 1992) atestam que o volume de material removido por abrasão cresce sutilmente com a velocidade de deslizamento até 2,5 m/s. Atribuem este acontecimento à influência do aumento de temperatura nas propriedades mecânicas do material (RIBEIRO, 2004).

2.9.5 Fatores externos: Força de compressão entre partículas e superfície

Ribeiro (2004) diz que a perda de material por abrasão é diretamente proporcional à compressão entre o abrasivo e a superfície metálica, sendo isso válido até determinado valor de força, a partir desta, o abrasivo sofre fratura.

2.10 REVESTIMENTO E SOLDAGEM

Segundo Hutchings (1992), entende-se por revestimento duro, uma liga homogeneamente depositada por soldagem, na superfície de um material mole, geralmente um aço de baixo ou médio carbono, com o propósito de aumentar sua dureza e resistência ao desgaste sem provocar perda significativa de ductilidade e tenacidade do substrato.

Oportuno destacar que na produção de cana-de-açúcar e de celulose, se utilizam facas picadoras no início da produção para o corte da matéria prima. O desgaste acentuado dessas ferramentas se deve à elevada velocidade de impacto na presença de elementos como areia, raízes, pedras e ferro que são coletados durante o processo de carregamento.

Para reduzir custos e aumentar produção, nessas facas e outros materiais que sofrem de desgaste, são realizados processos de soldagem com aplicação de revestimento duro. Nas indústrias de papel e celulose, o setor de manutenção realiza o revestimento com metal duro nesses equipamentos, os quais podem ser citados: Mesas de alimentação e dosagem, tambores descascadores, bocais de picador, etc.

2.10.1 Tipos de ligas de revestimento

O Metals Handbook (1998) também classifica as ligas de revestimento em função da composição química e as divide em cinco grupos:

Grupo 1:

a) Subgrupo 1A: Trata-se dos aços com baixo teor de liga, onde se observa em geral, o Cromo como o principal elemento de liga. O teor total de elementos de liga fica em torno de 2% a 6%. São utilizadas como camada base para revestimento de alta liga.

b) Subgrupo 1B: São semelhantes às ligas do grupo 1A, porém, com maior teor de elementos de liga (6% a 12%). Como exemplo temos os aços ferramenta.

Grupo 2:

- a) Subgrupo 2A: Apresentam o Cromo como principal elemento de liga (12% a 25%) e em alguns casos pode conter um certo teor de Molibdênio.
- b) Subgrupo 2B: Apresentam o Molibdênio como principal elemento de liga e também altos teores de Cromo.
- c) Subgrupo 2C: É formado pelos aços-manganês austeníticos, estando presente também o Níquel para estabilizar a austenita.
- d) Subgrupo 2D: Possuem um teor total de elementos de liga entre 30% a 37%, com o carbono variando entre 0,1% a 1%.

Grupo 3:

Compreende as ligas com alto teor de cromo, podendo apresentar níquel e/ou molibdênio. O teor de carbono varia entre 1,75% a 5%. Possuem como características: alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor.

Grupo 4:

Este grupo caracteriza-se pelas ligas à base de cobalto e níquel com teor total de elementos não ferrosos entre 50% e 99%.

- a) Subgrupo 4A: Compreende as ligas à base de cobalto e apresentam: resistência ao calor, a abrasão, à corrosão, ao desgaste metal-metal, entre outras.
- b) Subgrupo 4B: Trata das ligas à base de níquel e são indicadas para peças sujeitas à corrosão e desgaste metal-metal.

Grupo 5:

São ligas que possuem grânulos duros de carbonetos de tungstênio, titânio, tântalo ou cromo, distribuídos em uma matriz metálica. São aplicados onde ocorre abrasão intensa e a necessidade de corte de materiais

Tabela 4 - Classificação dos materiais para revestimentos duros.

Teor total de elementos de liga (%)		Elementos de liga principais
Materiais ferrosos de baixa liga		
1A	2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B	6 a 12	Cr, Mo, Mn
Materiais Ferrosos de alta liga		
1A	12 a 15	Cr, Mo
2B	12 a 25	Mo, Cr
2C	12 a 25	Mn, Ni
2D	30 a 27	Mn, Cr, Ni
3A	25 a 30	Cr, Ni, Mo
3B	25 a 50	Cr, Mo
3C	25 a 50	Co, Cr
Ligas a base de Níquel e a base de cobalto		
4A	50 a 100	Co, Cr, W
4B	50 a 100	Ni, Cr, Mo
4C	50 a 100	CCr, Ni, Mo
Carbonetos		
5	75 a 96	WC ou Wc em combinação com outros carbonetos como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica

Fonte: Adaptado da METALS HANDBOOK (1998).

2.10.2 Processos de soldagem para revestimento duro

Os processos de soldagem para aplicação de revestimentos devem possuir características como alta taxa de deposição e baixa taxa de diluição com o metal base, garantindo maior rendimento e menor influência do metal base na composição do revestimento (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Para Ribeiro (2004) a taxa de deposição e diluição são os fatores que mais afetam as propriedades do revestimento. Estes fatores são dependentes das variáveis do processo, como a tensão, a corrente elétrica e a velocidade de soldagem. Para alta produtividade, é importante que se tenha uma alta taxa de depósito com baixa diluição e penetração uniforme.

Dentre os vários processos de soldagem, WAINER; BRANDI; MELLO (1992, apud Marques et al., 2016) afirmam que a soldagem por eletrodo revestido e soldagem por arame tubular são os processos mais utilizados na deposição de revestimento duros.

Ribeiro (2004) afirma que, dentre todos os processos de soldagem, o processo a arco elétrico com eletrodo revestido (SAER) é o que possui maior flexibilidade entre todos, pois pode ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, etc.) com praticamente todas as espessuras do metal base (solda multi-passe) e em áreas de acesso limitado, o que representa uma vantagem muito importante para as soldagens de tubulações, as quais são realizadas no campo e em todas as posições. Além disso, o processo é menos sensível a correntes de ar do que o processo de solda a arco de proteção gasosa (MIG/MAG).

A soldagem com arames tubulares, segundo Marques et al (2016), é normalmente um processo semi-automático e muito semelhante ao processo MIG/MAG, no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo também tem suas semelhanças com a soldagem com eletrodos revestidos, sob o ponto de vista metalúrgico. Assim, a soldagem com arames tubulares é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem MIG/MAG como: alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e alto rendimento, que resultam em grande produtividade, e as vantagens da soldagem com eletrodos revestidos, como a alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo.

Segundo Batista e Nascimento (2004) devem ser considerados fatores de custo e eficiência em médio e longo prazo, observando-se as limitações e especialidades de cada processo, para a escolha do revestimento ideal.

Conforme Colaço e Maranhão (2014), a vantagem da técnica de soldagem com arame tubular está na obtenção de componentes com adequada resistência ao desgaste utilizando quantidade menor de materiais onerosos.

Os arames tubulares têm sido preferidos na aplicação de revestimentos duros por apresentarem maior produtividade que com eletrodos revestidos e maior flexibilidade que com arco submerso e, além disso, apresentarem menor aporte térmico, menos distorções e zona termicamente afetada (ZTA) (CONDE, 1986, apud LEITE; MARQUES, 2009).

2.11 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NOS REVESTIMENTOS DUROS

Em vários estudos realizados observa-se unanimidade quanto à grande influência da microestrutura na resistência ao desgaste abrasivo com baixas tensões.

Leite e Marques (2009) afirmam que, apesar da importância da dureza, não é esta que governa as propriedades de resistência ao desgaste, especialmente o abrasivo de baixa tensão, mas sim, a microestrutura.

Dias; Gomes (2003, apud RIBEIRO, 2004, p. 42), diz que

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

Em um estudo apresentado por Garcia (2011) observou-se que foram os revestimentos com adição de arame não energizado os que apresentaram superioridade na resistência ao desgaste, mas no caso da dureza foram os que tiveram valores menores, não sendo a dureza um parâmetro seguro para avaliar a resistência ao desgaste dos revestimentos.

Na soldagem para revestimento duro, tem-se a formação de vários tipos de carbonetos e, segundo Ribeiro (2004), dependendo do tipo de liga e tratamento

térmico esses carbonetos podem ser dos tipos: MC, M₆C, M₇C₃ e M₂₃C₇, onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos.

Gregolin (1990, apud RIBEIRO, 2004) citou que as ligas Fe-C-Cr empregadas para resistir ao desgaste abrasivo possuem matriz contínua que pode ser austenita metaestável ou martensita à temperatura ambiente, além de apresentar carbonetos do tipo M₇C₃ como fase descontínua. Estas ligas podem possuir composições químicas geralmente compreendidas em teores de carbono entre 1,2% a 4% e teores de cromo entre 6% a 40%. Indica-se que os teores inferiores a 10% de cromo conduzem a formação do eutético, em que a matriz contínua é na verdade o carboneto M₇C₃ e a fase dispersa é formada por glóbulos ou bastões da austenita ou produtos da sua transformação. Segundo Ribeiro (2004, p. 41),

A fração volumétrica dos carbonetos é um dos mais importantes parâmetros microestruturais que afetam a resistência ao desgaste abrasivo. Embora o alto nível de dureza dos carbonetos de cromo tipo M₇C₃ contribuem para a resistência ao desgaste, os mesmos são frágeis e o modo pelo qual estão presos na matriz pode desempenhar um papel importante na ocorrência ou não de trincas durante a abrasão

Ainda, segundo Colaço e Maranhão (2014) é desejável a presença de carbonetos primários em matriz dúctil, que podem ser obtidos pelo controle das variáveis de processo.

Para Ribeiro (2004), em ligas hipoeutéticas a remoção da austenita durante o processo de abrasão é impedida por essa fase estar ocupando os pequenos espaços entre os carbonetos, espaços que são menores do que as partículas abrasivas que não conseguem penetrar na matriz e a resistência ao desgaste abrasivo dessas ligas pode ser aumentada utilizando-se maiores teores de Cr e C. Em ligas eutéticas, apesar de agirem da mesma maneira, os carbonetos primários trincam e grande parte deles são desagregados, deixando a matriz exposta.

Sobre a adição de elementos de liga, Paranhos (apud LIMA; FERRARESI, 2009, p. 141) ressaltam que

o aumento dos teores de C e Cr reduzem a possibilidade de formação de austenita primária e o aumento da formação de microestrutura composta de

carboneto primário do tipo M_7C_3 e eutéticoaustenita-carbeto (M_7C_3), a microestrutura que apresenta maior resistência à abrasão de baixa tensão.

Um dos fatores que influenciam sobre a fração volumétrica dos carbonetos formados no revestimento é a diluição. A diluição do material base no revestimento é responsável pela perda de dureza e, possivelmente, aumento no desgaste (COLAÇO; MARANHO, 2014).

3 METODOLOGIA

Para melhor entendimento, a metodologia será dividida em Materiais, Equipamentos e Procedimentos.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Metal de base

Foi utilizado o aço ASTM A-36, cortado em chapas com dimensões de 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 12,7 mm de espessura, com composição química e propriedades mecânicas conforme Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Composição química do metal de base.

Composição química (% em peso)					
C	Mn	P	S	Si	Cu
0,25	0,8 - 1,2	0,040	0,050	0,40	0,20

FONTE: Catálogo aços para construção mecânica – TENAX.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas nominais do metal de base.

Propriedades mecânicas	
Limite de escoamento	250 MPa
Limite de ruptura	400 – 500 MPa
Dureza	10 HRc

FONTE: Catálogo aços para construção mecânica – TENAX.

3.1.2 Metais de adição

Para o processo de eletrodo revestido foi utilizado o eletrodo XHD 6710 (Figura 10), do tipo Fe-Cr-C, fabricado e vendido pela Eutectic Castolin, com 4 mm de diâmetro, o mesmo utilizado por Ribeiro (2004). Segundo a fabricante, este eletrodo possui alta taxa de deposição e elevada resistência ao desgaste por abrasão quando submetido à alta pressão e apresenta composição química conforme tabela 7.

Tabela 7 - Composição química e dureza do eletrodo XHD 6710.

Eletrodo Revestido XHD 6710 – Eutectic Castolin					
Análise Química (%)					Dureza de solda
C	Si	Mn	Cr	Fe	(HRc)
5,300	1,250	0,850	42,000	Restante	58 - 63

FONTE: Catálogo XHD 6710 – EUTECTIC CASTOLIN.

Figura 10 - Eletrodo Revestido XHD 6710.



FONTE: AUTORES, 2019

Para a soldagem com arame tubular, foi utilizado o eletrodo AN 3965, com 1,6 mm, fabricado e vendido pela Eutectic Castolin. Segundo a fabricante, possui depósito com estrutura complexa contendo carbonetos de Cr, Nb, B e V em matriz eutética. Devido a sua baixa diluição atinge a dureza especificada no primeiro passe de solda (60 - 65 HRc) e permite realizar a reconstrução multicamada e revestimento duro com o mesmo arame. O arame tubular AN 3965 apresenta a seguinte composição, conforme a Tabela 8:

Tabela 8 – Composição química do arame tubular AN 3965.

Arame Tubular AN 3965 – Eutectic Castolin								
Análise Química (%)								
C	Cr	Nb	V	Si	Mn	S	P	Fe
4,500	20,000	4,500	0,800	0,600	0,500	0,002	0,001	Restante

FONTE: EUTECTIC CASTOLIN, 2019.

3.1.3 Areia

Conforme a norma ASTM G 65, foi utilizada a areia de sílica AFS 50/70 (Figura 11), com 5% de retenção máxima na peneira de 50 e 95% de retenção mínima na peneira de 70.

Figura 11 - Areia de sílica AFS 50/70.



FONTE: AUTORES, 2019.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Fontes de soldagem

A fonte de soldagem empregada para execução dos revestimentos por eletrodo revestido foi uma inversora Lincoln Electric (Figura 12), com corrente máxima de 275 A.

Figura 12 - Fonte inversora Lincoln Electric.



FONTE: IMTEC

Para a soldagem com arame tubular foi utilizada uma Fonte Inversora Multiprocesso (Figura 13) para Soldagem MIG/MAG, TIG DC Lift Arc, Eletrodo Revestido e Goivagem na soldagem de aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio e arames tubulares com corrente máxima de 500 A.

Figura 13 - Fonte inversora Multiprocesso.



FONTE: Catálogo Eutectic Castolin.

3.2.2 Equipamentos para ensaio de desgaste

Para realização dos ensaios de desgaste de abrasão a baixa tensão, foi utilizado o equipamento Roda de Borracha das Faculdades Integradas de Aracruz/ES, construído conforme a norma ASTM G 65-16 (Figura 14).

Figura 14 -Equipamento Roda de Borracha.



FONTE: AUTORES, 2019.

3.2.3 Sistema de peneiramento da areia

A granulometria do abrasivo foi realizada em um sistema de peneiras sobrepostas com malhas 50 e 60, conforme a Figura 15. Essas peneiras têm certificação da AFS (American Foundry Society).

Figura 15 - Sistema de peneiramento.



FONTE: AUTORES, 2019.

3.2.4 Corte, usinagem e pesagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em uma máquina de policorte com refrigeração à água e, após, foram retificados pela empresa VSA Inoxidáveis.

As medidas da massa dos corpos de prova, antes e depois do ensaio de desgaste foram realizadas no laboratório de ensaios da engenharia química e civil da FAACZ em uma balança de precisão.

3.3 PROCEDIMENTOS

3.3.1 Soldagem de revestimentos

Antes do processo de soldagem foram cortados 8 corpos de prova nas dimensões de 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 12,7 mm de espessura, sendo que foram utilizados 4 corpos de prova para cada processo de soldagem, onde 1 foi utilizado para aferição do equipamento de desgaste por abrasão e os outros 3 foram utilizados para ensaio de desgaste por abrasão. Após o corte, os corpos de prova foram preparados para os processos de soldagem.

Os corpos de prova foram fixados em uma bancada para evitar distorções pelo calor de soldagem. Em seguida foi aplicada a solda de revestimento com eletrodo revestido XHD 6710 com uma camada em 4 corpos de prova, de forma manual como é executado nas indústrias, obedecendo os seguintes parâmetros (Tabela 9), conforme parâmetros apresentados e estudados anteriormente por Ribeiro (2004) que apresentou maior resistência ao desgaste.

Tabela 9 - Parâmetros de soldagem para revestimento duro com eletrodo revestido XHD 6710.

Parâmetros de soldagem	
Corrente	100 A
Temperatura entre passes	200°C
Tensão	29 V
Velocidade de Soldagem	300 mm/min
Aporte térmico	0,580 kJ/mm

FONTE: AUTORES, 2019.

Logo após foi realizado a soldagem com arame tubular AN 3965 em outros 4 corpos de prova, dentro dos parâmetros recomendados pelo fabricante, de forma que o aporte térmico seja próximo ao aporte térmico do processo com eletrodo revestido XHD 3710, garantindo condições semelhantes para que os processos sejam comparados. Esses parâmetros estão expressos na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem para revestimento duro arame tubular AN 3965.

Parâmetros de soldagem	
Corrente	150 A
Temperatura entre passes	200°C
Tensão	25 V
Velocidade de Soldagem	400 mm/min
Aporte térmico	0,563 kJ/mm

FONTE: AUTORES, 2019.

Para a realização das camadas de revestimento, inicialmente foram feitos cordões longitudinalmente ao seu comprimento, na extensão de 100 mm, um cordão em cada borda, sendo preenchido em seguida toda a amostra. Antes de se iniciar a soldagem de um novo cordão, foi realizada a escovação do cordão anteriormente depositado para a eliminação de pós óxidos, fuligem, carepa, etc. Entre os passes de soldagem foi respeitada a temperatura máxima de 200°C, utilizando-se um termômetro a laser.

Após a realização da soldagem de revestimento, os corpos de prova foram cortados, através de policorte conforme o item 4.2.4, nas dimensões que estabelece a norma ASTM G 65-16: 75 mm (comprimento) x 25 mm (largura) x 12,6 mm (espessura), conforme as Figuras 16, 17 e 18. E também foram retificados em todas as suas faces para se evitar as descontinuidades. Das sobras dos corpos de prova foram retirados pedaços que foram utilizados nos ensaios metalográficos.

Figura 16 - Comprimento do corpo de prova.



FONTE: AUTORES, 2019.

Figura 17 - Largura do corpo de prova.



FONTE: AUTORES, 2019.

Figura 18 - Espessura do corpo de prova.



FONTE: AUTORES, 2019.

3.3.2 Ensaio de desgaste abrasivo à baixa tensão

Após a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram ensaiados no equipamento denominado Roda de Borracha.

De acordo com a norma ASTM G 65-16 a força exercida pelo corpo de prova contra a roda de borracha foi de 130 N. O número de revoluções da roda de borracha foi de 6000 ciclos, para garantir esse controle cada ciclo foi convertido em unidade de tempo e registrado com auxílio de um timer. O equipamento da FAACZ possui um conjunto motor-reductor, dessa forma é possível manter a rotação da roda de borracha a 200 ± 10 rpm, conforme solicita a norma.

Para retificação do anel de borracha foi utilizada uma lixa de 280 mesh, que foi introduzida entre o anel e uma amostra, conservando somente a força exercida pela própria alavanca e acionando o motor por alguns minutos em baixa rotação. O fluxo de areia foi mantido entre 300 a 400 gramas por minuto, conforme estabelece a norma ASTM G 65-16.

Antes da realização dos ensaios foi feita uma aferição do equipamento com dois corpos de prova nas mesmas condições, sendo que após cada ensaio a roda de borracha foi retificada novamente. Como esta retificação diminui o diâmetro da mesma, a norma ASTM G 65-16 estabelece a necessidade de corrigir a perda de massa e de volume, conforme as equações 1 e 2.

Figura 19 - Execução do ensaio com Roda de Borracha.



FONTE: AUTORES, 2019.

3.3.3 Ensaio metalográfico

Foi cortada transversalmente uma amostra de cada corpo-de-prova, lixadas na face transversal com lixas de 180 a 1200 mesh, polidas com alumina 0,5 μm , atacadas com Nital 2% durante 10s e com Murakami (5g de NaOH, 5g de ferrocianeto de potássio, 50ml de água destilada) durante 30s para que a microestrutura e os carbonetos fossem revelados. Em seguida, foram analisadas no microscópio óptico. O ensaio foi realizado no laboratório de metalografia da FAACZ.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão com roda de borracha tanto para o revestimento com eletrodo revestido (XHD 6710) quanto para o revestimento com arame tubular (AN 3965), ambos fabricados pela Eutectic Castolin, obtidos através da aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios metalográficos para cada processo, comparando suas propriedades.

4.1 RESISTÊNCIA A ABRASÃO

Os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão de baixa tensão por roda de borracha, para cada processo de soldagem (eletrodo revestido e arame tubular) estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Perda de massa (g) e perda de volume ajustado (mm³) em função do processo de soldagem.

Revestimento	Eletrodo Revestido (XHD 6710)	Arame Tubular (AN 3965)
Tensão (V)	29	25
Velocidade média de soldagem (mm/min)	300	400
Corrente (A)	100	150
Aporte térmico (kJ/mm)	0,580	0,563
Perda de massa (g)	0,039	0,692
Perda de volume (mm ³)	5,177	92,204

FONTE: AUTORES, 2019.

A partir da Tabela 11, observa-se a maior perda de volume no processo de soldagem com Arame Tubular AN 3965.

As Figuras 20 e 21 são dos corpos de prova de revestidos com Eletrodo Revestido XHD 6710 e com Arame Tubular AN 3965, respectivamente, após o ensaio de abrasão.

Figura 20 – Corpo de prova 1 revestido com Eletrodo Revestido XHD 6710 após ensaio de abrasão.



FONTE: AUTORES, 2019.

Figura 21 – Corpo de prova 4 revestido com Arame Tubular AN 3965 após ensaio de abrasão.



FONTE: AUTORES, 2019.

Nas amostras revestidas com eletrodo revestido XHD 6710 (Figura 20), observou-se a presença de trincas superficiais. Segundo Ribeiro (2004), essas trincas podem estar relacionadas com a composição química obtida na camada de revestimento, devido ao alto teor de carbono e cromo.

De acordo com Koteck (1992, apud RIBEIRO, 2004), os carbonetos de cromo estão projetados para trincar como uma forma de alívio de tensões. Porém, no presente

trabalho as amostras revestidas com Arame Tubular AN 3965 (Figura 21) não apresentaram trincas superficiais e ainda assim, apresentaram menor resistência ao desgaste abrasivo, o que sugere que a presença de trincas superficiais não teve influência no resultado da resistência ao desgaste abrasivo.

4.2 DILUIÇÃO E MICROESTRUTURA

Nas Figuras 22 e 23 observa-se uma maior penetração dos cordões de solda no metal base na soldagem com Arame Tubular AN 3965, ocorrendo, desta forma, uma maior diluição entre o metal base e o metal de adição nesse processo quando comparado com o processo de Eletrodo Revestido XHD 6710.

Figura 22 - Corte transversal aos cordões de solda revelando a diluição entre o metal base e o metal de adição do Eletrodo Revestido XHD 6710.



Fonte: AUTORES, 2019.

Figura 23 - Corte transversal aos cordões de solda revelando a diluição entre o metal base e o metal de adição do Arame Tubular AN 3965.



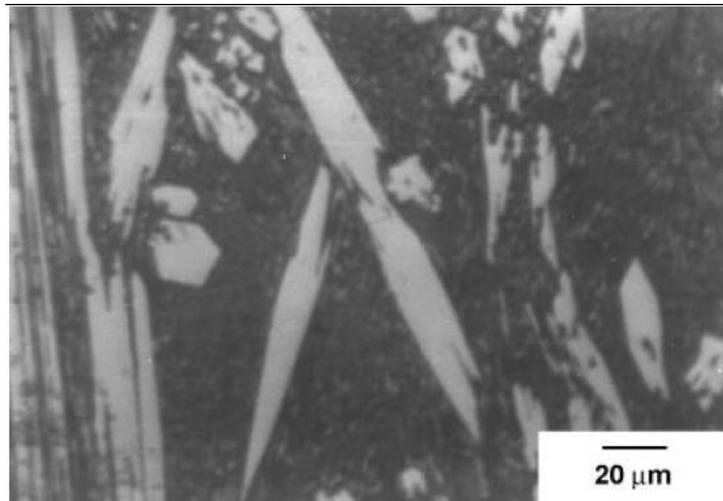
Fonte: AUTORES, 2019

Segundo Ribeiro (2004) uma maior diluição tem influência negativa na resistência ao desgaste por abrasão, de forma que essa influência é explicada pela relação entre a diluição e a microestrutura final do revestimento.

O estudo realizado por Mendonça; Silva; Carvalho (2016) demonstra que, à medida que o nível de diluição aumenta, a concentração de Fe aumenta em níveis praticamente proporcionais em relação à redução dos elementos de liga do metal de adição. Maranhão e Colaço (2014) observaram que com o aumento da diluição diminuiu-se a concentração de carbono no metal de adição e, conseqüentemente, a redução da resistência ao desgaste abrasivo.

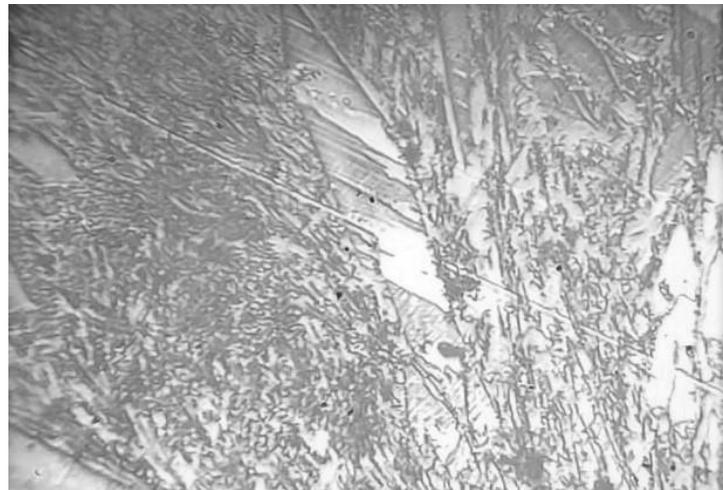
Em relação à microestrutura, na amostra revestida com Eletrodo Revestido XHD 6710, obteve-se resultados semelhantes aos encontrados por Ribeiro (2004), conforme as Figuras 24, 25, 26 e 27 a seguir:

Figura 24 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, por Ribeiro (2004), com aumento de 250x.



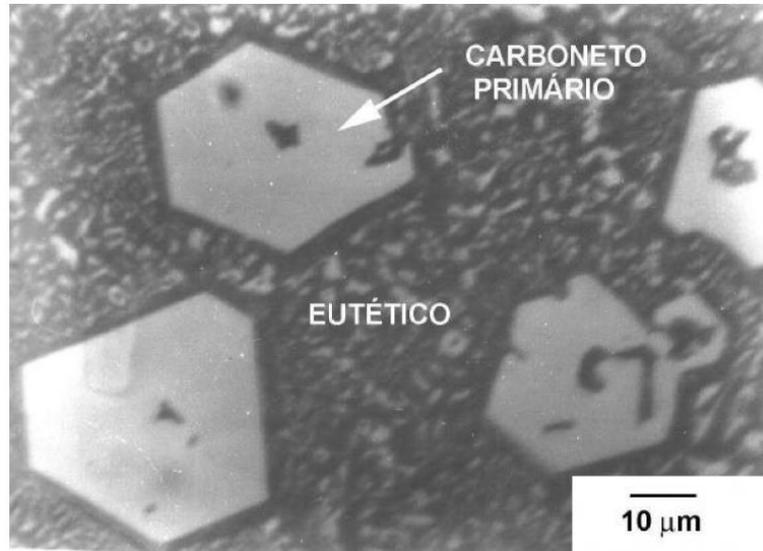
FONTE: Ribeiro, 2004.

Figura 25 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, com aumento de 250x.



FONTE: AUTORES, 2019.

Figura 26 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, por Ribeiro (2004), com aumento de 600x.



FONTE: Ribeiro, 2004.

Figura 27 – Microestrutura do metal depositado por Eletrodo Revestido XHD 6710, com 100A, com aumento de 400x.



FONTE: AUTORES, 2019.

Na Figura 25, observa-se os carbonetos primários do tipo M_7C_3 precipitados na matriz eutética, microestrutura semelhante a encontrada por Ribeiro (2004), conforme Figura 24, as amostras com as características acima, demonstraram menor perda volumétrica, fato que está fortemente ligado a concentração de carbonetos primários.

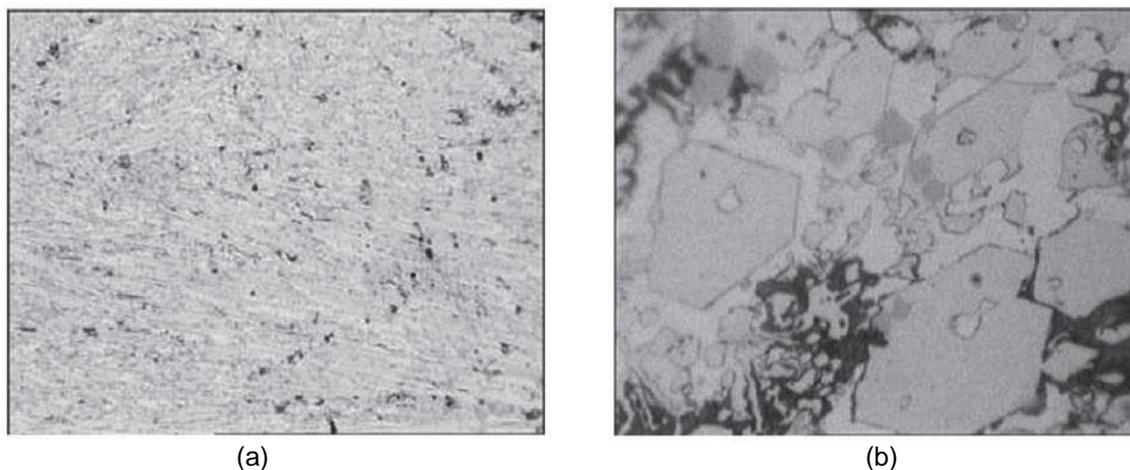
Segundo Fiore, Kosel e Fulcher (1983), a fração volumétrica de carbonetos é um dos mais importantes parâmetros microestruturais que afetam a resistência ao desgaste abrasivo devido à alta dureza. Porém, o nível de dureza e a maneira como os carbonetos do tipo M_7C_3 estão ligados à matriz contribuem também para a ocorrência de trincas devido à fragilidade dos mesmos.

A soldagem foi realizada na corrente de 100A, melhor faixa de resultado do Ribeiro (2004), o que também ocorreu na presente análise. Apesar da ocorrência de trincas quando submetidas ao teste de desgaste, as peças revestidas pelo XHD6710 foram as que menos perderam massa.

Na Figura 27, observa-se a presença de carbonetos primários hexagonais em matriz eutética também encontrados por Ribeiro (2004), na Figura 26, na amostra soldada a 100A, configuração microestrutural foi encontrada próxima a superfície de desgaste.

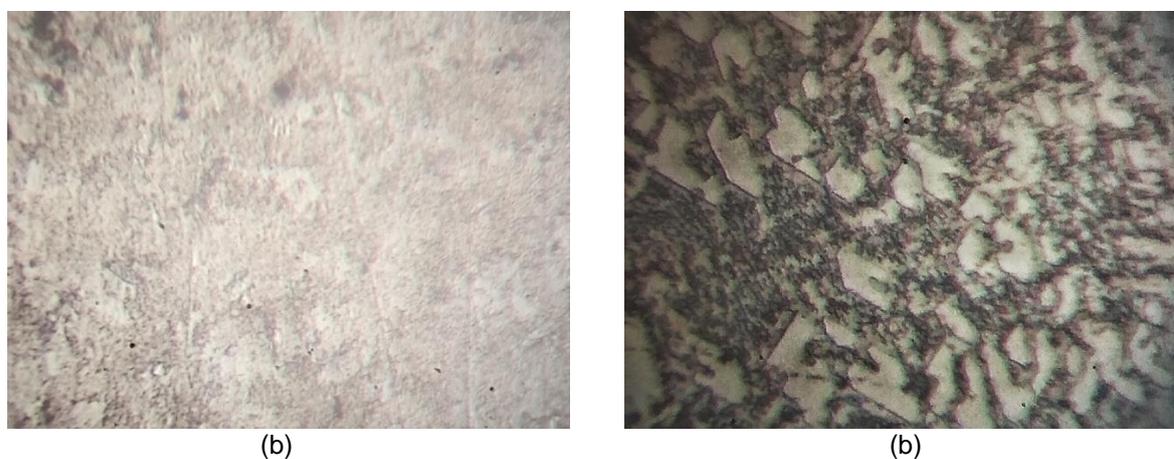
Na análise da microestrutura do revestimento obtido por meio da soldagem com Arame Tubular AN 3965 (Figura 29), foram encontrados carbonetos poligonais e prismáticos de ferro e cromo, constituinte eutético formado por carbonetos de Fe-Cr, austenita e martensita (áreas escuras), com estrutura hipereutética na superfície, assim como encontrado no estudo apresentado por Leite e Marques (2009), representado na Figura 28.

Figura 28 – Microestrutura do revestimento com liga Fe-Cr-Nb-B-C, com aumento de 250x (a) 1000x(b).



FONTE: Leite; Marques, 2009.

Figura 29 – Microestrutura do metal depositado por Arame Tubular AN 3965, com aumento de 250x (a) 400x(b).



FONTE: AUTORES, 2019.

Segundo Ribeiro (2004), uma maior concentração de Cr e C nas ligas de revestimento resultam em uma maior resistência ao desgaste abrasivo, pois estes elementos de liga proporcionam um aumento na formação de carbonetos.

A composição do arame tubular AN 3965 possui menor concentração de Cr e C em comparação com o XHD 6710, por isso as amostras revestidas por arame obtiveram maior perda volumétrica e também menor concentração de carbonetos primários.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o processo de soldagem para revestimento duro com Eletrodo Revestido XHD 6710 apresentou melhor resultado de resistência quando submetido ao ensaio de abrasão à baixa tensão com o equipamento roda de borracha comparado ao processo de soldagem com Arame Tubular AN 3965.

Por apresentar maior quantidade de carbono e cromo, e, conseqüentemente maior formação de carbonetos primários, o revestimento obtido com eletrodo revestido XHD 6710 apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão em comparação com o revestimento obtido com arame tubular AN 3965.

6 REFERÊNCIAS

BATISTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A. Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas, **Spectru Instrumental Científico**, 2004.

BUDINSKI, K. G; HARDFACING, V - **Choosing a process**. Welding Design & Fabrication, 1987.

COLAÇO, F. H. G; MARANHO, O. Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti. **Soldagem Insp**. São Paulo: Vol. 19, Nº. 01, p.058-068, 2014.

EYRE, T. S. The Mechanisms of Wear. **Tribology International**. P. 91 – 95, Abril, 1978.

FIORE, N.F; KOSEL, T.H; FULCHER, J.K. The Effect of Carbide Volume Fraction on the Low Abrasion Resistance of High Cr-Mo White Cast Irons. **Wear**. p.313-325,1983.

GARCIA, D. B. C. **Aplicação de revestimento duro utilizando processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

GATES, J. Two-Body and Three-Body Abrasion: A Critical Discussion. **Wear**, p.139-146, 1998.

HUTCHINGS, I. M. Tribology. **Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, p. 273, 1992.

REVISTA informativa trimestral da Eutectic Castolin. **Inovação**, nº 04, 2013.

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

LEITE, R. V. M; MARQUES, P. V. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de três ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arames tubulares. **Soldagem Insp**. São Paulo: Vol. 14, Nº 4, p.329-335, 2009.

LIMA, A. C; FERRARESI, V. A. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo: Vol. 14, p. 140–150, 2009.

MARQUES, F. M; COSTA, R. C; GALINDRO, G. N; ROCHA, A. S. Análise de desgaste abrasivo do revestimento duro a base de carbonetos de cromo depositado por SMAW. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. Vol. 20, N.º 2, pp. 13-23, 2016.

METAL Handbook Desk Edition. CRC Press, 2ª Ed., 1998.

MENDONÇA, E; CRUZ DA SILVA, Y; DILLE, J; CARVALHO SILVA, C. **Efeito da Diluição Sobre a Microestrutura da Liga AWS ER NiCrMo-14 na Soldagem de Revestimento pelo processo TIG com Alimentação de Arame Frio**. UFC, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, Ceará: p. 6, 2016.

PINTAÚDE, G. **Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaio Instrumentado de Dureza**. 2002. 200p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 2002.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2004.

SOUZA, D. D. B. G.de. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

STANDARD Test Method for Measuring Abrasion. **ASTM G65-16: Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**, 2001.

STOETERAU, R. L. **Tribologia**. Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 179 f., 2004. Disponível em: <http://www.scribd.com/doc/19271358/StoeterauTribologia>. Acesso em: 22 nov. 2019.

VILLABÓN, L; SINATORA, A. Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo Roda-de-borracha para o estudo do comportamento Tribológico de aços. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**. Vol. 13, p. 1-13, 2006.

WAINER, E; BRANDI, S; MELLO, F. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

ZUM GAHR, K. H. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology Series**, v. 10, Elsevier, Science Publishers, Amsterdam. 560 p. 1987.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE MASSA

Tabela 12 - Perda de massa associada ao desgaste.

PERDA DE MASSA						
PROCESSO DE SOLDAGEM	CORPO DE PROVA	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PERDA DE MASSA (g)	MÉDIA PERDA DE MASSA (g)	DESVIO PADRÃO
ELETRODO REVESTIDO (XHD 6710)	1	160,337	160,298	0,039	0,039	0,002
	2	159,507	159,466	0,041		
	3	161,110	161,073	0,037		
ARAME TUBULAR (AN 3965)	4	159,439	158,715	0,724	0,692	0,031
	5	158,244	157,554	0,690		
	6	161,103	160,441	0,662		

FONTE: AUTORES, 2019.

APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE VOLUME AJUSTADO

Tabela 13 - Perda de volume ajustada associada ao desgaste.

PERDA DE MASSA							
PROCESSO DE SOLDAGEM	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO DA RODA INICIAL (mm)	DIÂMETRO DA RODA APÓS O USO (mm)	PERDA DE VOLUME (mm ³)	PERDA DE VOLUME AJUSTADA (mm ³)	MÉDIA PERDA DE VOLUME AJUSTADA (mm ³)	DESVIO PADRÃO
ELETRODO REVESTIDO (XHD 6710)	1	228,6	228,3	5,166	5,172	5,177	0,263
	2	228,6	228,1	5,430	5,442		
	3	228,6	227,9	4,901	4,916		
ARAME TUBULAR (AN 3965)	4	228,6	227,5	95,894	96,358	92,204	4,035
	5	228,6	227,2	91,391	91,954		
	6	228,6	227,0	87,682	88,300		

FONTE: AUTORES, 2019.