**FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ**
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRENO ZUCCOLOTTO COUTINHO**
**LEONARDO SPINASSÉ**
**MAX GABRIEL FLORINDO GOMES**
**PATRICK MANTOVANI RAMPINELLI**

# INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À ABRASÃO NO REVESTIMENTO COM ELETRODO XHD 6710

**ARACRUZ**
**2018**

BRENO ZUCCOLOTTO COUTINHO
LEONARDO SPINASSÉ
MAX GABRIEL FLORINDO GOMES
PATRICK MANTOVANI RAMPINELLI

# INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À ABRASÃO NO REVESTIMENTO COM ELETRODO XHD 6710

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof MSc. João Paulo Calixto.

**ARACRUZ**
**2018**

## AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, pelo dom da vida, sabedoria, saúde e por manter-nos firmes para sempre prosseguir com nossos sonhos

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ, que nos possibilitaram o conhecimento para a realização de nosso do sonho, em especial ao professor orientador João Paulo Calixto da Silva pelas aulas no decorrer do curso e orientação prestada ao grupo.

À nossa família e amigos pela dedicação, paciência e eterno companheirismo.

A Conmec Industrial e Metalmecânica Becker, por contribuir com a fabricação dos corpos de provas, parte fundamental do nosso trabalho.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que pudéssemos vencer mais este obstáculo.

## RESUMO

O presente trabalho visa avaliar a influência da variação da corrente nas propriedades mecânicas de dureza e resistência a abrasão na soldagem de revestimento com eletrodo XHD 6710 da Eutectic e Castolin, visando maximizar a resistência ao desgaste de peças onde são aplicados este tipo de revestimento. Para a realização dos testes, foram confeccionados 15 corpos de prova em aço ASTM A36 que foram revestidos por uma camada depositada por processo de soldagem variando a intensidade de corrente de soldagem. Os corpos de prova foram ensaiados no equipamento denominado Roda de Borracha utilizando como abrasivo a areia de sílica AFS (American Foundry Society) 50/70, especificada pela ASTM G 65-16. As amostras foram submetidas a tratamentos na superfície de desgaste e pesadas antes e depois de cada ensaio, para que a perda de massa e volume fosse aferida com exatidão. Os resultados dos testes foram comparados aos resultados alcançados por diversos autores da área, mostrando-se coerentes com a literatura. O melhor resultado de resistência a abrasão a baixa tensão obtidos para os revestimentos soldados variando apenas a intensidade de corrente, foi com 100A, tensão de soldagem de 29V e velocidade de soldagem de 300mm/min.



Palavras-chave: Resistência à abrasão. Revestimento duro. Eletrodo XHD 6710.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre: a) Abrasão a dois corpos, b) Abrasão a dois corpos e c) Erosão.....17

Figura 2 – Desgaste abrasivo por sulcamento.....18

Figura 3 – Desgaste abrasivo por micro corte.....19

Figura 4 – Desgaste abrasivo por micro trincamento ou lascamento.....19

Figura 5 – Representação esquemática do processo de desgaste abrasivo.....20

Figura 6 – Esquema de um britador de mandíbulas.....21

Figura 7 – Equipamento para desgaste por impacto e abrasão.....22

Figura 8 – Esquema de uma máquina de ensaio pino sobre disco.....22

Figura 9 – Representação esquemática do abrasômetro roda de borracha.....24

Figura 10 – Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo.....30

Figura 11 – Fonte inversora Lincoln Electric.....37

Figura 12 – Roda de Borracha.....38

Figura 13 – Sistema de peneiramento.....39

Figura 14 – Corpo de Prova após soldagem de revestimento.....41

Figura 15 – Espessura do Corpo de Prova após soldagem de revestimento.....42

Figura 16 – Timer utilizado para a conversão dos ciclos para tempo.....43

Figura 17 – Execução do ensaio.....44

Figura 18 – Esquema representativo das medidas de dureza.....45

Figura 19 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 100A. Aumento 250 X.....48

Figura 20 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 120A. Aumento 250 X.....49

Figura 21 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 140A. Aumento 250 X.....49

Figura 22 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 160A. Aumento 250 X.....50

Figura 23 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 180A. Aumento 250 X.....51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de ensaios por roda de borracha e areia seca (sílica A50-70).....26

Tabela 2: Tamanhos de peneiras recomendados pela norma ASTM G 65-16.....26

Tabela 3 – Dureza de abrasivos e fases28

Tabela 4 – Composição química do aço ASTM A-36.....35

Tabela 5 – Propriedades mecânicas nominais do aço ASTM A-36.....35

Tabela 6 – Composição química e dureza do metal de adição.....36

Tabela 7 – Perda de massa (g) e perda de volume ajustado ($mm^3$) em função da corrente de soldagem (A).....46

Tabela 8 – Ensaio de dureza Rockwell C.....51

Tabela 9 – Perda de massa associada ao desgaste.....60

Tabela 10– Perda de volume ajustado associada ao desgaste.....61

Tabela 11 – Dureza.....62

## LISTA DE SIGLAS

AFS – American Foundry Society

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

DIN – Deutsches Institut für Normung

SAE – Society of Automotive Engineers

XHD – Xuper High Deposition

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO** ..... 11
**2 OBJETIVOS** ..... 13
2.1 OBJETIVO GERAL ..... 13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 13
**3 REFERENCIAL TEÓRICO** ..... 14
3.1 DESGASTE ..... 14
**3.1.1 Classificação** ..... 15
3.2 MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO ..... 17
3.3 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO ..... 20
**3.3.1 Ensaio de Abrasão por Goivagem** ..... 20
**3.3.2 Ensaio de Abrasão e Impacto** ..... 21
**3.3.3 Ensaio de Abrasão a Alta Tensão** ..... 22
**3.3.4 Ensaio de abrasão a baixa tensão** ..... 23
**3.3.5 Ensaio de abrasão a baixa tensão por roda de borracha e areia seca – ASTM G 65-16** ..... 23
3.3.5.1 Procedimentos recomendados pela norma ASTM G 65-16 ..... 25
3.3.5.2 Abrasivo recomendado pela norma ASTM G 65-16 ..... 26
3.4 FATORES QUE AFETAM O DESGASTE ABRASIVO ..... 26
**3.4.1 Propriedades do Abrasivo** ..... 26
3.4.1.1 Tipos do abrasivo e dureza ..... 27
3.4.1.2 Tamanho do abrasivo ..... 29
3.4.1.3 Formas do abrasivo ..... 29
**3.4.2 Fatores externos** ..... 30
3.4.2.1 Velocidade relativa e força de compressão entre o abrasivo e superfície ..... 30
3.5 SOLDAGEM E REVESTIMENTO ..... 31
**3.5.1 Tipos de ligas de revestimentos** ..... 32
**4 METODOLOGIA** ..... 35
4.1 MATERIAIS ..... 35
**4.1.1 Metal de base** ..... 35
**4.1.2 Metal de adição** ..... 36

**4.1.3 Areia** ..... 36
4.2 EQUIPAMENTOS ..... 36
**4.2.1 Fonte de soldagem** ..... 36
**4.2.2 Equipamento para ensaio de desgaste** ..... 37
**4.2.3 Sistema de peneiramento da areia** ..... 38
**4.2.4 Corte, usinagem e pesagem dos corpos de prova** ..... 39
4.3 PROCEDIMENTOS ..... 40
**4.3.1 Soldagem de revestimento** ..... 40
**4.3.2 Ensaio de desgaste abrasivo à baixa tensão** ..... 42
**4.3.3 Ensaio de dureza** ..... 44
**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES** ..... 46
5.1 RESISTÊNCIA À ABRASÃO ..... 46
5.2 DUREZA ..... 51
**6 CONCLUSÃO** ..... 54
**7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... 55
**APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE MASSA** ..... 60
**APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE: PERDA DE VOLUME AJUSTADO** ..... 61
**APENDICE C – RESULTADOS DE DUREZA** ..... 62

# 1 INTRODUÇÃO

O desgaste de peças e equipamentos proporciona consideráveis perdas econômicas no meio industrial, sendo uma das causas de paradas emergenciais. Segundo TYLCZAK (1992) o desgaste abrasivo atinge áreas da indústria metal-mecânica, mineração, papel e celulose e também em atividades ligadas a agricultura e processamento mineral.

As indústrias de papel e celulose possuem uma preocupação no controle de desgaste dos seus equipamentos. O processo de produção é bastante afetado por partículas abrasivas (areia, pedras, metais, etc), presentes na madeira provenientes das florestas de eucaliptos.

Para MONTEIRO e CUNHA (1993) uma das técnicas mais empregadas para reconstruir as peças desgastadas e/ou prepara-las para resistir a grandes solicitações de desgaste, é a aplicação de revestimentos podendo ser por soldagem, metalização, entre outros processos.

Para LIMA e FERRARESI (2009) a aplicação de revestimentos com o objetivo de minimizar o desgaste, busca uma sobrevida em serviço para os componentes. Dessa forma, ocorre o reaproveitamento de peças que seriam descartadas, o aumento da eficiência do processo em que os elementos reconstituídos e/ou protegidos estão empregados, e consequentemente, diminuição dos custos com paradas emergenciais de manutenção.

A soldagem de revestimento tem assumido uma importância cada vez maior, por realizar reconstituições de peças avariadas e deposições de camadas protetoras com baixo custo operacional, apresentando-se como uma solução prática e viável devido às grandes vantagens e flexibilidade desta técnica. (BRANDIM et al, 2002).

A Revista Inovação Eutectic Castolin nº4 (2013) cita que o desgaste custa anualmente a indústria mundial 4 bilhões de dólares em materiais e peças sobressalentes, sem incluir custos com perdas de produção, problemas de qualidade, multas pelos atrasos na

entrega dos produtos, entre outros.

Com toda a importância do estudo do desgaste, bem como, a aplicação de revestimentos. O presente trabalho propõe avaliar a influência da variação da corrente nas propriedades mecânicas de dureza e resistência a abrasão na soldagem de revestimento com eletrodo XHD 6710, para assim, verificar e validar, por meio de ensaios de dureza e resistência abrasão a faixa de corrente para melhor aplicação no pátio de madeiras de uma indústria de celulose.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da variação da corrente nas propriedades mecânicas de dureza e resistência a abrasão na soldagem de revestimento com eletrodo XHD 6710.

## 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar os ensaios de resistência à abrasão, através da máquina Roda de Borracha da Faacz, construída com base na norma ASTM G65-16.
- Realizar os ensaios de dureza na escala Rockwell C, nos revestimentos estudados.
- Verificar a faixa de corrente de soldagem de revestimento para melhor aplicação no pátio de madeiras de uma indústria de celulose.

# 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicialmente será abordado as definições referentes ao desgaste, os tipos, incluindo classificações, os mecanismos de desgaste por abrasão, os ensaios disponíveis e os fatores que afetam o desgaste abrasivo.

Em seguida, serão apresentados os conceitos de soldagem de revestimento, bem como a classificação dos tipos de ligas, e as características do revestimento a ser aplicado.

## 3.1 DESGASTE

O desgaste pode ser definido como “uma mudança cumulativa e indesejável em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas” (STOETERAU, 2004).

Segundo ZUM GAHR (1987):

> Atrito e desgaste não são propriedades materiais intrínsecas, mas são características do sistema de engenharia. O atrito é a resistência ao movimento e surge das interações de sólidos na área real de contato. Atrito e desgaste são, respectivamente, causas sérias de dissipação de energia e dissipação de material.

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

Nos metais, o desgaste pode ocorrer entre atrito com outros metais, sólidos não metálicos (por exemplo: areia), líquidos em movimento ou partículas solidas ou líquidas provenientes de um fluxo gasoso (RAMALHO, 1997).

### 3.1.1 Classificação

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).

Na prática, diversos tipos de desgaste agem de forma simultânea. Neste caso, o estudo deverá ser em torno do mecanismo preponderante. (WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992).

Para BUDINSKI (1987) os tipos de desgaste são classificados por: Abrasão, erosão, adesão e fadiga térmica.

A norma DIN 50320 cita quatro tipos principais de desgaste: O adesivo, por fadiga de superfície, por reação triboquímica e abrasivo.

De forma ampla, CASTRO (2010) diferenciou esses quatro tipos de mecanismos de desgaste citados pela norma DIN 50320, da seguinte maneira:

- **Desgaste adesivo ou por fricção:** Formação e ruptura da união adesiva interfacial. Exemplos: Junções soldadas a frio, desgaste por atrito;
- **Desgaste por fadiga de superfície ou contato:** Fadiga e formação de trincas em regiões superficiais devido a ciclos de tensão, resultando em separações de material;
- **Desgaste por reações triboquímicas:** Desenvolvimento de produtos resultantes de reações químicas desenvolvidas entre o par de desgaste e o meio interfacial;
- **Desgaste por abrasão:** Remoção de material mediante processo de riscamento (processo de micro corte).

Entre tantas classificações supostas é consenso o desgaste por abrasão e por ser tratar do objeto de estudo, este será mais bem detalhado.

EYRE (1991) e KASSIM (2000) afirmam que o desgaste abrasivo é um dos mais

encontrados na prática (50% dos casos), sendo considerado como o mais severo.

Nas literaturas há vários mecanismos de desgaste por abrasão. DAVIS (1980) e MARINO (1988) classificam estes da seguinte maneira: Abrasão a baixas tensões, abrasão a altas tensões e abrasão por goivagem.

- **Abrasão a baixas tensões:** É o desgaste causado pelo deslocamento de partículas livres, a baixa tensão e com pequenos ângulos de ataque, sobre a superfície afetada. Como exemplo de situações que podem ter esse tipo de mecanismo, temos: Equipamentos que manuseiam areia, minérios, terras, etc.
- **Abrasão a altas tensões:** É o desgaste causado pelo deslocamento forçado de partículas abrasivas entre duas superfícies tensionadas. A alta tensão favorece a penetração das partículas, ocasionando o ataque a superfície. Exemplos: Processo de moagem, cilindros laminadores, etc.
- **Abrasão por goivagem:** É o desgaste causado por altas tensões e impactos de partículas abrasivas, que produzem grandes sulcos e ranhuras. Um exemplo prático são esteiras transportadoras de minério bruto com transferência por queda, que devido à dimensão e peso das partículas provocam desgaste acentuado na superfície a ser atacada.

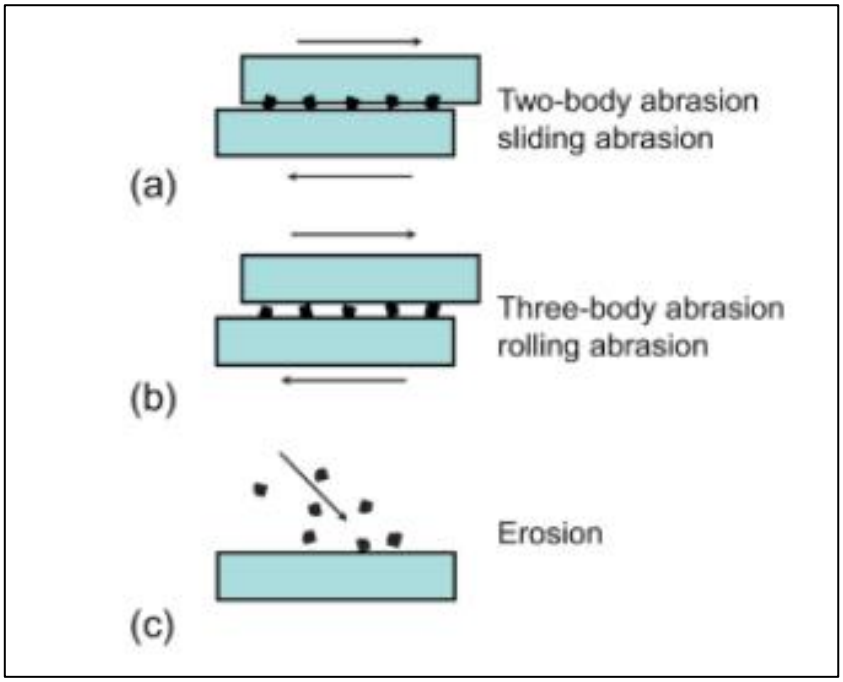
Outra forma de classificação é por abrasão a dois corpos, abrasão a três corpos e erosão. HUTCHINGS e SHIPWAY (1992) relatam que no desgaste abrasivo o material pode ser removido de uma superfície por partículas duras, ou ás vezes por protuberâncias duras na contra face, forçadas contra e movendo-se ao longo da superfície. Para eles a abrasão a dois corpos é causada por protuberâncias duras ou por partículas duras presas em uma das superfícies, que ao entrar em contato com a outro material causam o desgaste abrasivo. Exemplo: Processo de lixamento. Na abrasão a três corpos, as partículas duras ficam livres entre as superfícies, sem nenhuma ligação entre elas. Exemplo: Desgaste causado por areia.

A erosão, segundo HUTCHINGS e SHIPWAY (1992), é o desgaste causado por partículas duras que atacam a superfície, transportadas por um fluxo de gás ou um líquido

que flui. Um exemplo encontrado na indústria é o desgaste de tubulações devido a presença de partículas duras no fluido a ser transportado.

A Figura 1 ilustra os mecanismos de desgaste de abrasão a dois e três corpos, e também o de erosão.

Figura 1 – Diferença entre: a) Abrasão a dois corpos, b) Abrasão a dois corpos e c) Erosão.




FONTE: HUTCHINGS & SHIPWAY, 1992.

Analisando os contextos há uma assimilação entre as classificações de DAVIS (1980) e MARINO (1988) e a de HUTCHINGS e SHIPWAY (1992), nas quais o processo de abrasão a baixas tensões se relaciona com o de abrasão de dois corpos, o processo de abrasão a altas tensões está ligado ao de abrasão de três corpos, e a abrasão por goivagem com a erosão.

## 3.2 MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO

O mecanismo básico de desgaste por abrasão foi proposto por KHRUSHCHOV e BABICHEV *apud* WAINER, BRANDI e HOMEN (1992). Segundo os autores, existem dois processos agindo quando o abrasivo entra em contato com a superfície: o primeiro seria

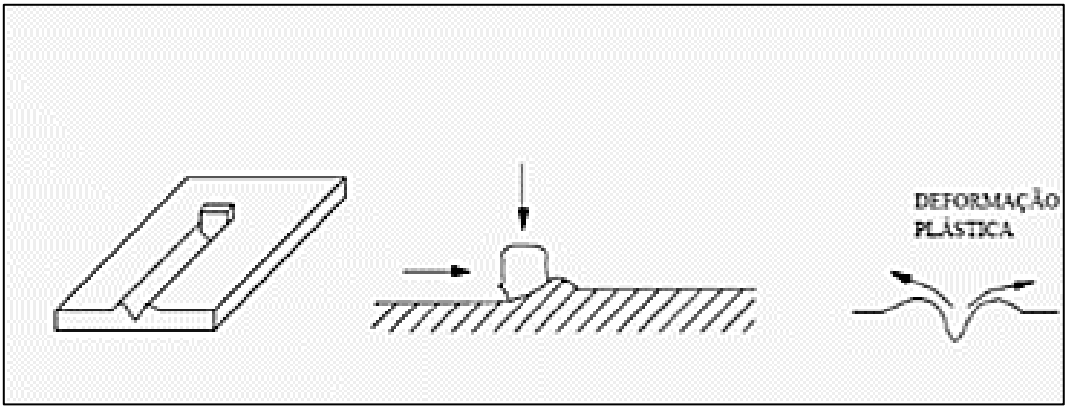
a formação de um sulco devido à deformação plástica, porém sem remoção de material, o segundo, a remoção do material da superfície na forma de pequenos cavacos. Estudos posteriores mostraram que aproximadamente 40% do material é removido por cavacos e o restante por deformação plástica (cisalhamento).

Para GREGOLIN (1990) há diferentes tipos de micromecânismos de desgaste por abrasão, são eles:

- **Micromecânismos dúcteis**: Sulcamento e microcorte;
- **Micromecânismos frágeis:** Microtrincamento ou lascamento.

O sulcamento é provocado pelo deslocamento da partícula rígida, que deforma plasticamente a superfície de ataque, formando um sulco. Na formação do sulco, não há perda de material (massa), porém, com o ataque de mais partículas essa massa deformada é removida. (Figura 2).

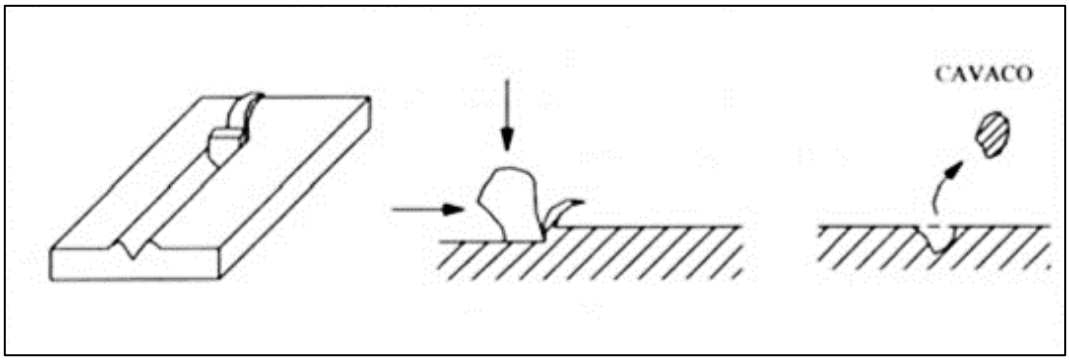
Figura 2 – Desgaste abrasivo por sulcamento.




FONTE: GREGOLIN, 1990.

O micro corte ocorre quando as partículas abrasivas impõem uma tensão de cisalhamento sobre a superfície atacada, suficientemente para formar pequenos cavacos e promover a ruptura do material dúctil. (Figura 3).

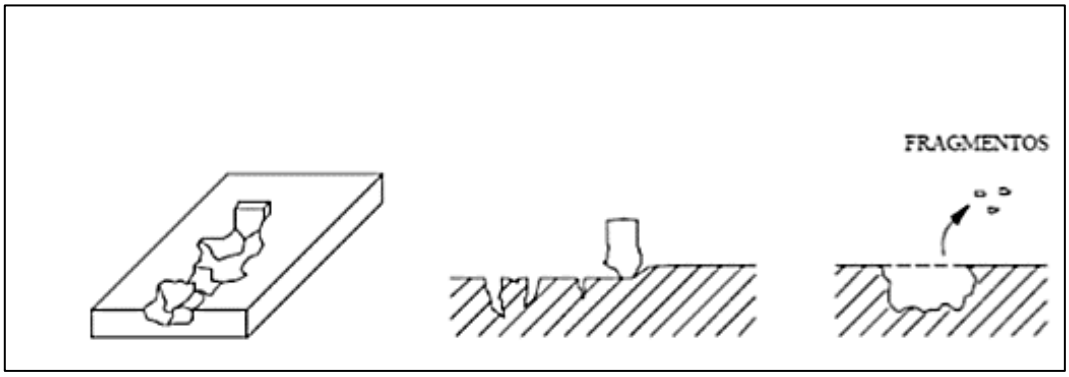
Figura 3 – Desgaste abrasivo por micro corte.




FONTE: GREGOLIN, 1990.

O micro trincamento ou lascamento consiste na remoção de pequenos fragmentos devido a formação e crescimento de fissuras, a partir do ataque das partículas abrasivas. (Figura 4)

Figura 4 – Desgaste abrasivo por micro trincamento ou lascamento.

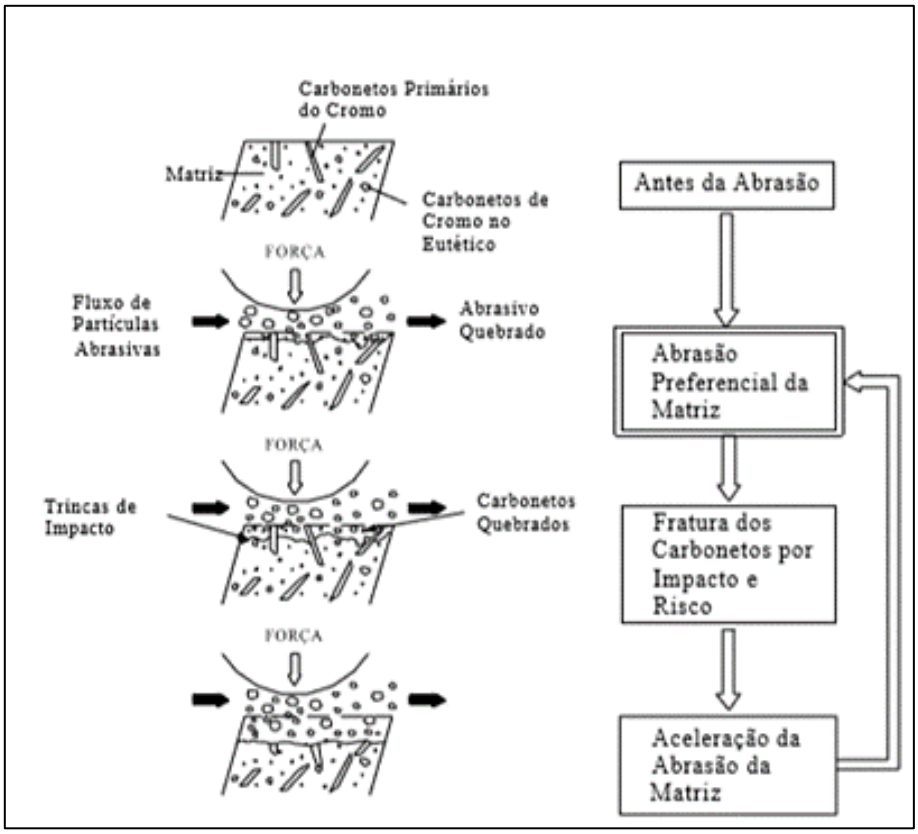



FONTE: GREGOLIN, 1990.

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

HERNANDEZ (1997) e FUJIMURA et al (1998) propuseram um método de desgaste abrasivo onde as partículas entram em contato com a superfície revestida do material, provocando o desgaste. Nesta superfície desgastada os carbonetos primários de cromo estão sem proteção, portanto, sua resistência ao impacto é menor, consequentemente, ocorre o trincamento, fraturamento e posterior eliminação do revestimento. (Figura 5).

Figura 5 – Representação esquemática do processo de desgaste abrasivo.




FONTE: FUJIMURA et al, 1988.

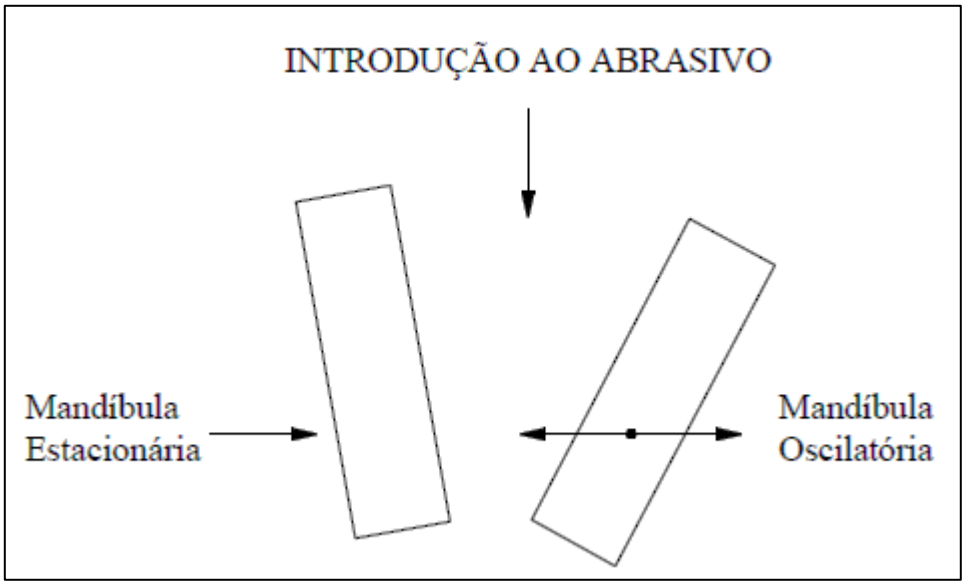
## 3.3 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

Para CASTRO (2010) com a finalidade de realizar estudos sobre os tipos de desgaste, são construídos equipamentos que possibilitam essas análises em laboratório. Como são simulações de difícil controle, ainda não foi possível formular uma máquina universal, desta forma, equipamentos, como: Tribômetro tipo pino-contra disco, abrasômetro roda de borracha, entre outros, ajudam os estudiosos nos mais diversos tipos de ensaios, cada um com sua finalidade.

### 3.3.1 Ensaio de Abrasão por Goivagem

É a forma de desgaste mais difícil de se avaliar. O equipamento mais utilizado para a realização dos ensaios para este tipo de desgaste é o britador de mandíbulas.. (NOBLE, 1984).

Figura 6 – Esquema de um britador de mandíbulas.



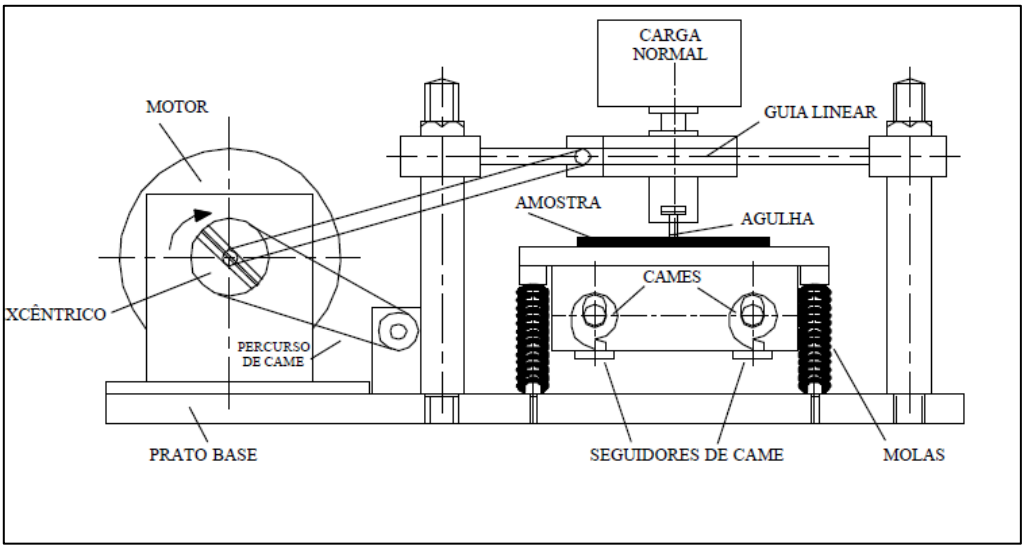

FONTE: NOBLE, 1984.

### 3.3.2 Ensaio de Abrasão e Impacto

Ao avaliar que o desgaste por goivagem se apresenta sob condições de abrasão e impacto, KENNEDY E HASHMI (1996), desenvolveram um outro tipo de equipamento para realizar os ensaios.

O mecanismo consiste em fixar o corpo de prova junto à mesa de trabalho, que é posicionada a uma base, presa a quatro pilares de guias deslizantes. Para ensaios de impacto a mesa move-se verticalmente nos portes de guia, através de cames. Forçando o corpo de prova contra o dispositivo abrasivo, que está preso acima do corpo de prova. Para ensaios de abrasão, ocorre movimentos no plano horizontal, onde o dispositivo abrasivo é movimentado horizontalmente sobre a amostra por meo de um ajustador excêntrico. Ambos, tanto a abrasão quanto as condições de impacto são dirigidas pelo mesmo motor. (RIBEIRO, 2004).

Figura 7 – Equipamento para desgaste por impacto e abrasão.

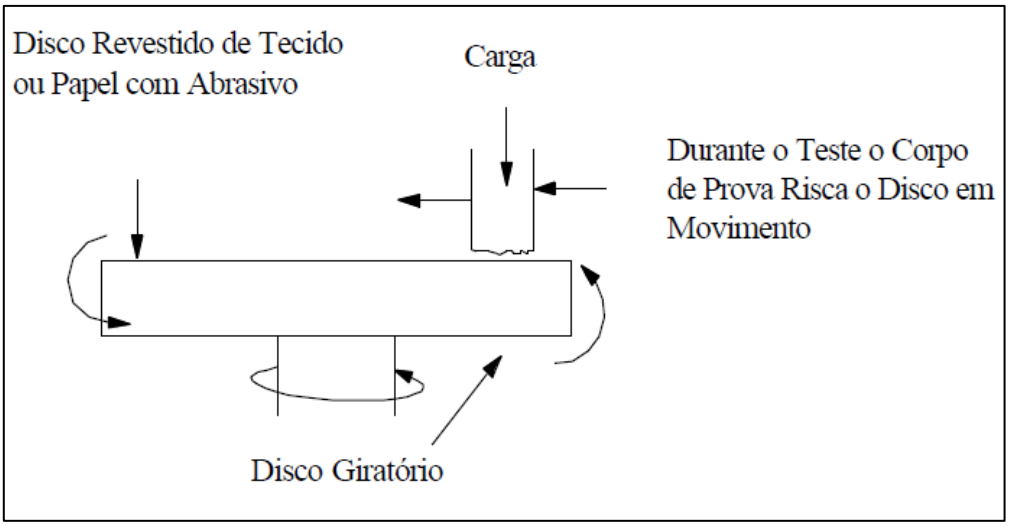



FONTE: KENNEDY & HASHMI, 1996.

### 3.3.3 Ensaio de Abrasão a Alta Tensão

O equipamento mais utilizado é o de pino sobre disco, onde um pino produzido da liga a ser ensaiada risca uma roda abrasiva. A carga aplicada ao pino determina o grau de abrasão a altas tensões. (NOBLE, 1984).

Figura 8 – Esquema de uma máquina de ensaio pino sobre disco.




FONTE: NOBLE, 1984.

### 3.3.4 Ensaio de abrasão a baixa tensão

Calcula-se que 50% de todos os problemas de desgaste ocorridos nas indústrias são devido a abrasão, e por isso muitos laboratórios procuraram pesquisar e estudar o fenômeno do desgaste abrasivo para uma gama de materiais. (Ribeiro, 2004).

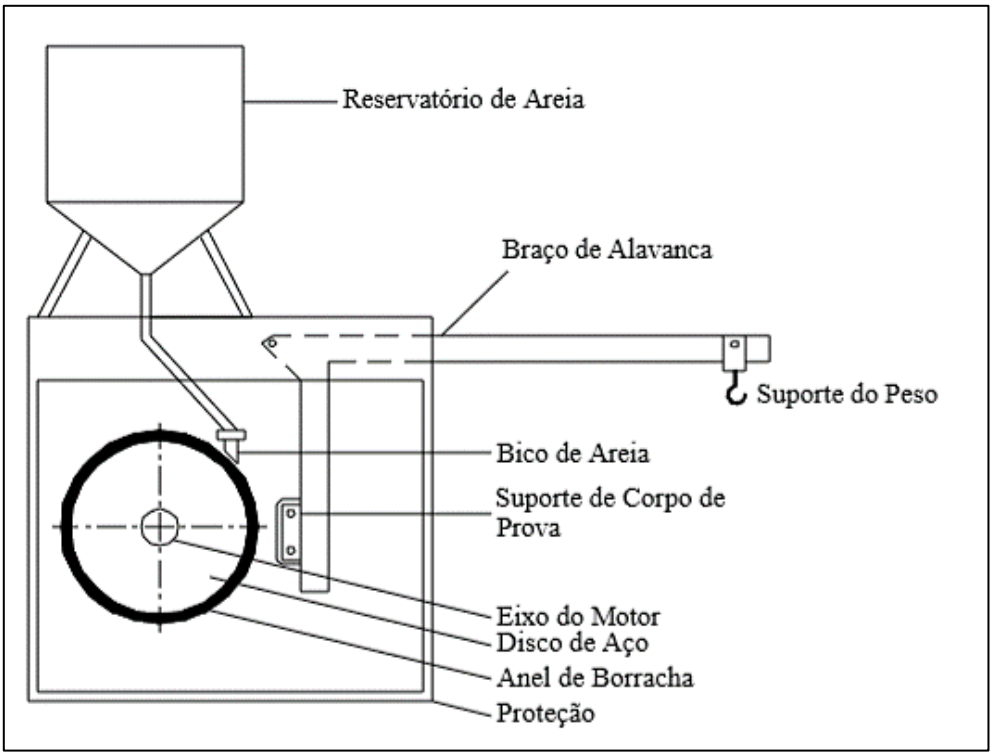
Frequentemente, mecanismos de ensaio de desgaste são projetados para simular uma aplicação específica, e por isso um número grande de métodos foram desenvolvidos. A configuração mais comum usada para abrasão a três corpos (corpo de prova, roda giratória e partículas abrasivas) tem seus princípios baseados na ASTM 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).

### 3.3.5 Ensaio de abrasão a baixa tensão por roda de borracha e areia seca – ASTM G 65-16

De forma resumida, o corpo de prova padrão é pressionado contra um anel de borracha de dureza padronizada. Entre o corpo de prova e o anel de borracha há adição de partículas abrasivas (areia) de dimensão e composição controladas, que são responsáveis pelo riscamento do corpo de prova. (ASTM G 65-16, 2001).

A Figura 9 representa esquematicamente o sistema de um abrasômetro do tipo roda de borracha.

Figura 9 – Representação esquemática do abrasômetro roda de borracha.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

Na figura 9 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 escoa 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 a diferença de densidades entre os materiais, permitindo assim a comparação entre eles. Essa conversão pode ser obtida pela seguinte equação 1:

$$VP\ (mm^3) = \frac{Massa\ perdida\ (g)}{Densidade\ do\ material\ (g/cm^3)}\ x\ 1000 \qquad (1)$$

Onde $VP$ simboliza o volume perdido da amostra.

É importante destacar que a 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:

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

Onde 228,6mm é o diâmetro inicial da roda de borracha, $VPA$ e $VP$ simbolizam o volume perdido ajustado e o volume perdido da amostra, respectivamente.

#### 3.3.5.1 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 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.

A Tabela 1 relaciona os parâmetros de testes dos cinco procedimentos:

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: ASTM G65-16, 2001.

#### 3.3.5.2 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: ASTM G65-16, 2001.

## 3.4 FATORES QUE AFETAM O DESGASTE ABRASIVO

Para WAINER, BRANDI e HOMEN (1992) os fatores que influenciam no desgaste abrasivo são as propriedades do abrasivo e fatores externos (velocidade relativa e pressão).

### 3.4.1 Propriedades do Abrasivo

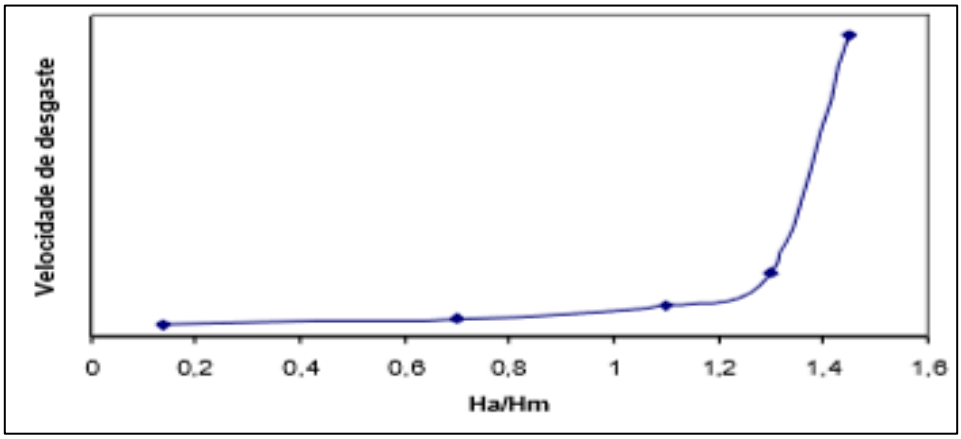
As propriedades variam de acordo com o abrasivo utilizado, por isso, é importante a análise dos: tipos de abrasivos e dureza, tamanho e forma do abrasivo.

#### 3.4.1.1 Tipos do abrasivo e dureza

Para FERRARINI (1998) a dureza é uma propriedade mecânica, que por muitas vezes é utilizada como um indicador de resistência ao desgaste. Isto ocorre devido à relação linear entre essas duas características encontradas em muitos metais puros, cerâmicas e alguns aços. Porém, devido à grande variedade de abrasivos com durezas diferentes, é consenso utilizar a dureza relativa entre o abrasivo e o material (Ha/Hm), para determinar o mecanismo de desgaste, bem como a severidade do processo.

WAINER, BRANDI e HOMEN, (1992) utilizaram a dureza relativa (Ha/Hm) e descreveu três comportamentos da velocidade de desgaste. O Gráfico 1 indica esta relação.:

Gráfico 1 – Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal.




FONTE: WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992.

- **1º comportamento (Ha/Hm entre 0,2 e 1,1):** Nesta fase a velocidade de desgaste é pequena, pois a dureza do material é ligeiramente maior que a do abrasivo, portanto, o processo de riscamento é quase que inexistente (Severidade baixa do processo).
- **2º comportamento (Ha/Hm entre 1,1 e 1,3):** Indica uma região de transição, pois a dureza do abrasivo está maior em relação a do material, portanto, o processo de riscamento começa a se desenvolver de forma mais efetiva (Severidade média do processo).

- **3º comportamento (Ha/Hm entre 1,3 e 1,7):** Nesta fase a dureza do abrasivo é ligeiramente maior que a dureza do material, dessa forma, o processo de riscamento é mais efetivo e a velocidade de desgaste aumenta de forma significativa (Severidade alta do processo).

Segundo RIBEIRO (2004) na literatura especializada há boa convergência na afirmação de que o desgaste por abrasão a baixas tensões é proporcional à dureza da superfície sujeita a solicitação, embora também dependa do tamanho e concentração de volume das fases duras como carbonetos, fosfetos e outras. A tabela 3 apresenta os valores de dureza do abrasivo e das diferentes fases em aços e ferros fundidos.

Tabela 3 – Dureza de abrasivos e fases.

| Minerais | Dureza (Hv) | Fases | Dureza (Hv) |
|---|---|---|---|
| Gesso | 36 | Ferrita | 70-200 |
| Calcita | 140 | Perlita, pura | 250-320 |
| Fluiorita | 190 | Perlita, ligada | 300-460 |
| Aparita | 540 | Austenita, 12% Mn | 170-230 |
| Vidro | 500 | Austenita, baixa liga | 250-350 |
| Feldspato | 600-750 | Austenita, Fe alto Cr | 300-600 |
| Silex | 950 | Martensita | 500-1010 |
| Quartzo | 900-1280 | Cementita | 840-1100 |
| Granada | 1350 | Carbonetos de Cr (Fe, $Cr)_7 C_3$ | 1200-1600 |
| Carvão | 32 | Carboneto de Mo | 1500 |
| Cal | 110 | Carboneto de W | 2400 |
| Coque | 200 | Carboneto de V | 2800 |
| Minério de Ferro | 470 | Carboneto de Ti | 3200 |
| Sinter | 770 | Carboneto de Bo | 3700 |
| Corindu | 1800 | Carboneto de Nb | 2400 |
| Diamante | 10000 | Carboneto de Fe | 1100 |

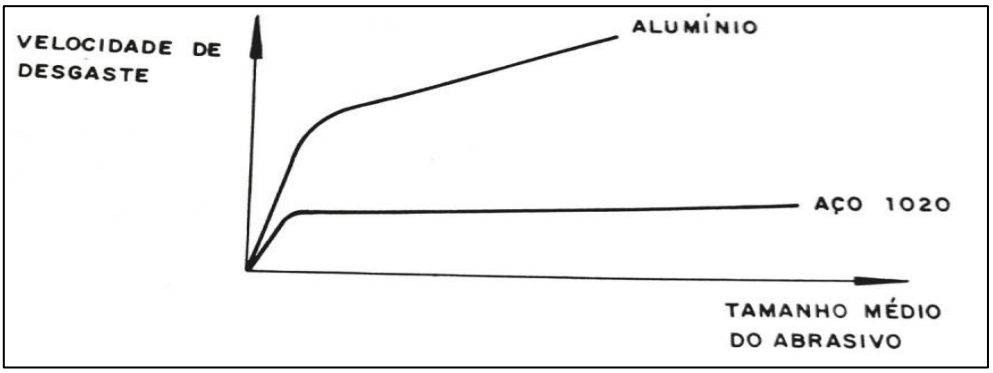
FONTE: EYRE, 1978.

#### 3.4.1.2 Tamanho do abrasivo

Com base no Gráfico 2, WAINER, BRANDI e HOMEN (1992) afirmam que o desgaste aumenta rapidamente até um tamanho crítico do abrasivo, a partir deste, o aumento é mais suave.

Nota-se também que não há uma relação clara entre o desgaste e o tamanho do abrasivo. O que pode se dizer, em geral, é que o volume de material removido aumenta com o tamanho do abrasivo. (MACHADO, 2008).

Gráfico 2 – Velocidade de desgaste em função do tamanho médio do abrasivo.




FONTE: WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992.

#### 3.4.1.3 Formas do abrasivo

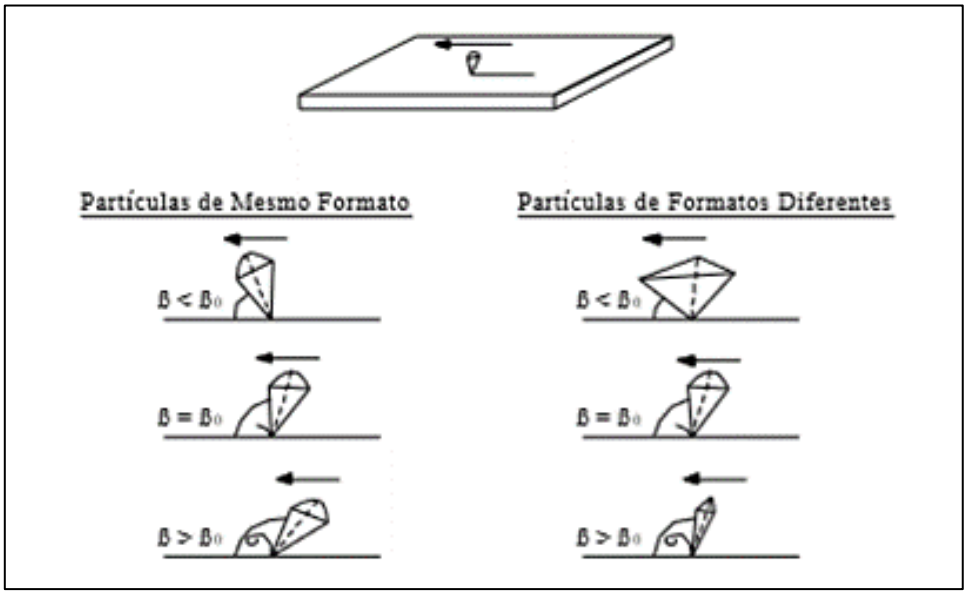
As geometrias dos abrasivos podem ser: arredondadas, subarredondas, angulares e subangulares. (WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992).

Segundo HERNANDEZ (1997), os abrasivos angulares, ou seja, que apresentam faces cortantes são mais severos que os arredondados. E quando aliados ao impacto, ou fortes pressões, estas partículas podem causar a formação de cavaco e acentuar ainda mais o desgaste.

Estudos apontam que partículas angulares de baixa dureza, ocasionam desgaste mais acentuado do que partículas arredondadas de alta dureza. (WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992).

A Figura  a seguir, apres10enta as geometrias da partícula abrasiva no desgaste abrasivo.

Figura 10 – Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo.




FONTE: HERNANDEZ, 1997.

### 3.4.2 Fatores externos

Além do material abrasivo, o desgaste é influenciado por variáveis externas que tem a capacidade de aumentar ou diminuir a severidade da abrasão.

#### 3.4.2.1 Velocidade relativa e força de compressão entre o abrasivo e superfície

WAINER, BRANDI e HOMEN (1992) destacam que o desgaste aumenta com a variação da velocidade de deslizamento das partículas abrasivas. Ele também cita que o desgaste é proporcional a pressão aplicada e que essa pressão é limitada pela deformação da partícula ou pela instabilidade do abrasivo.

HARWORTH (1949) realizou ensaios com aço SAE 1045 temperado, onde variou a velocidade e a força de compressão. Para uma mudança de 250 rpm para 1035 rpm, os resultados mostraram um aumento aproximado de duas vezes na taxa de perda de massa. Ao manter a velocidade de 250 rpm e dobrar a carga aplicada, o valor da taxa de

perda de massa aumentou duas vezes e meia.

Outro aspecto importante que deve ser considerado na análise desses fatores externos (velocidade e carga) é o calor gerado. Para MOORE (1974), o atrito das partículas com o revestimento base pode gerar calor suficiente para alterar as propriedades mecânicas do material e contribuir para aumentar o desgaste.

## 3.5 SOLDAGEM E REVESTIMENTO

A soldagem de revestimento consiste na deposição de um material cujas propriedades mecânicas sejam mais nobres do que a do metal de base. Dessa forma é possível atenuar os efeitos de desgaste, corrosão, aumentando a vida útil dos equipamentos\materiais. (TREVISAN e BRANTIS, 1993).

Cada aplicação deve ser minuciosamente definida e parâmetros como: tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem e outros especiais, devem ser controlados. (RIBEIRO, 2004).

Nas indústrias de papel e celulose, a soldagem de revestimento é muito importante, principalmente na área do Pátio de Madeiras. Esta área recebe a madeira proveniente dos plantios florestais, portanto, trazem consigo muitas partículas abrasivas (areia, metal, pedras, etc). Antes de entrar no processo industrial, essas toras passam por um processo de lavagem que visam retirar o excesso dessas partículas, porém, não é totalmente eficaz.

Dentro do processo produtivo esses abrasivos tendem a desgastar os componentes por abrasão, com isso, 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.

### 3.5.1 Tipos de ligas de revestimentos

As normas ASME A5.13-80 e ASME A5.21-80 classificam as ligas de revestimento a partir da composição química. (WAINER, BRANDI e HOMEN, 1992).

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 tunsgstênio, titânio, tântalo ou cromo, distribuídos em uma matriz metálica. São aplicados onde ocorre abrasão intensa e a necessidade de corte de materiais.

O Quadro 1 resume a classificação dos metais para revestimento duro:

Quadro 1: Classificação dos materiais para revestimento duro.

| | 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 37 | Mn, Cr, Ni |
| 3A | 25 a 50 | Cr, Ni, Mo |
| 3B | 25 a 50 | Cr, Mo |
| 3C | 25 a 50 | Co, Cr |
| | Ligas a base de níquel e à base de cobalto | |
| 4A | 50 a 100 | Co, Cr, W |
| 4B | 50 a 100 | Ni, Cr, Mo |
| 4C | 50 a 100 | Cr, 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: METALS HANDBOOK 1998.

# 4 METODOLOGIA

Com o intuito de facilitar a compreensão das atividades a serem desenvolvidas para alcançar os objetivos propostos, serão descritos a seguir, os materiais, os equipamentos e a metodologia planejada.

## 4.1MATERIAIS

### 4.1.1 Metal de base

O metal de base que foi revestido é o aço ASTM A36 nas seguintes dimensões: 100mm (comprimento) x 50mm (largura) x 12,7mm (espessura). Nas Tabelas 4 e 5 a seguir, são apresentadas a composição química e as propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4 – Composição química do aço ASTM A-36.

| **Composição Química (% em peso)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **C** | **Mn** | **P** | **S** | **Si** | **Cu** |
| 0,25 | 0,80 – 1,20 | 0,040 | 0,050 | 0,40 | 0,20 |

FONTE: CATÁLOGO AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA – TENAX.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas nominais do aço ASTM A-36.

| **Propriedades Mecânicas** | |
|---|---|
| Limite de escoamento | 250 Mpa |
| Limite de Ruptura | 400 – 500 Mpa |
| Dureza Rockwell | 10 HRC |

FONTE: CATÁLOGO AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA – TENAX.

### 4.1.2 Metal de adição

Como consumível de revestimento foi utilizado o eletrodo XHD 6710 no diâmetro de 4 milímetros, cujo fabricante é a Eutectic Castolin.

Segundo o fabricante, os depósitos realizados com este eletrodo são extremamente resistentes ao desgaste por abrasão submetidos a alta pressão, suportam choques moderados e ausência total de escória. A tabela 6 apresenta a composição química deste eletrodo.

Tabela 6 – Composição química e dureza do metal de adição.

| **Eletrodo revestido XHD 6710 – Eutectic & Castolin** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Análise Química (%) | | | | | Depósito de Solda (Dureza – HRc) |
| C | Si | Mn | Cr | Fe | |
| 5,300 | 1,250 | 0,850 | 42,000 | Restante | 62,00 |

FONTE: CATÁLOGO XHD 6710 – EUTECTIC CASTOLIN.

### 4.1.3 Areia

O abrasivo utilizado foi a areia de sílica AFS (American Foundry Society) 50/70, que é especificada pela norma ASTM G 65-16. Para adequar a granulometria, a norma fixa uma porcentagem de 5% máxima de retenção na peneira 50 e 95% mínima na peneira 70.

A dureza do abrasivo está entre 900Hv a 1280Hv.

## 4.2 EQUIPAMENTOS

### 4.2.1 Fonte de soldagem

A fonte de soldagem empregada para execução dos revestimentos foi uma inversora Lincoln Electric, com corrente máxima de 275A.

Figura 11 – Fonte inversora Lincoln Electric.

FONTE: IMTEC

### 4.2.2 Equipamento 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 12 – Roda de Borracha.

FONTE: AUTORES, 2018

### 4.2.3 Sistema de peneiramento da areia

Para adequar a granulometria do abrasivo foi utilizado um sistema de peneiras sobrepostas com malhas 40, 50, 70 e 100, conforme estabelecido pela norma ASTM G65-16. As peneiras são da marca Granutest, certificada pela AFS.

Figura 13 – Sistema de peneiramento

FONTE: AUTORES, 2018

### 4.2.4 Corte, usinagem e pesagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em uma máquina serra fita horizontal com refrigeração a água e após, passaram por processo de retificação na empresa Becker Metalmecânica.

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.

## 4.3 PROCEDIMENTOS

Para cumprir com os objetivos propostos pelo trabalho, serão especificadas as variáveis (corrente e velocidade de soldagem) e em seguida, serão realizados os experimentos.

A Eutetic Castolin, fabricante do eletrodo XHD 6710, recomenda para o eletrodo de 4 milímetros de diâmetro a faixa de corrente de 140A a 180A. Com base nessa recomendação, serão definidas as variáveis: corrente (100A, 120A, 140A, 160A e 180A) e a velocidade será fixada em 300mm/min.

### 4.3.1 Soldagem de revestimento

Antes da execução da soldagem foi necessário um tratamento do metal de base, conforme a seguir:

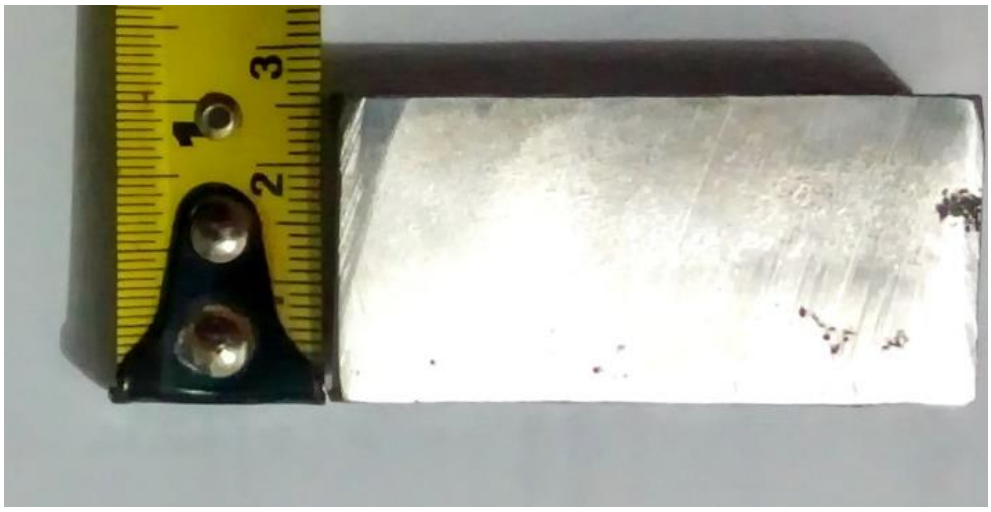
Foram cortados 15 corpos de prova de aço ASTM A-36, nas dimensões de 100mm (comprimento) x 50mm (largura) x 12,7mm (espessura), e após foi realizado o processo de lixamento para eliminar possíveis óxidos e/ou contaminantes. Esses corpos de prova foram fixados em uma bancada de aço através de soldagem por eletrodo revestido, com o propósito de se evitar distorções devido ao calor gerado na soldagem de revestimento.

A soldagem foi realizada na empresa Conmec Metalmecânica na cidade de Aracruz/ES, de forma manual. Para cada intensidade de corrente de soldagem determinada, foram soldados três corpos de prova. Os parâmetros de soldagem foram previamente ensaiados em chapa de aço auxiliar, sendo a intensidade de corrente de soldagem regulada manualmente no próprio equipamento e a velocidade verificada por meio de cronômetro, sendo possível assim, determinar a velocidade de soldagem em cada corpo de prova.

Os passes de soldagem foram realizados longitudinalmente (na extensão de 100mm) e para evitar superaquecimentos foi mantido uma temperatura entre os passes de 200ºC, controlados através de um pirômetro a laser.

Após a realização da soldagem de revestimento, os corpos de prova foram cortados, através de serra fita horizontal elétrica conforme citado no item 4.2.4, nas dimensões que estabelece a norma ASTM G 65-16: 75mm (comprimento) x 25mm (largura). E também retificados em todos as suas faces para se evitar as descontinuidades.

Figura 14 – Corpo de Prova após soldagem de revestimento



FONTE: AUTORES, 2018

Figura 15 – Espessura do Corpo de Prova após soldagem de revestimento

FONTE: AUTORES, 2018.

### 4.3.2 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 é de 130 N e o número de revoluções da roda de borracha é de 6000 ciclos. Para garantir o controle das revoluções foi instalado um timer, convertendo o número de ciclos para tempo, de acordo com as recomendações de rotação do redutor segundo a norma e os obtidos no equipamento da FAACZ, onde é possível manter a rotação da roda de borracha a 200 ± 10 rpm, conforme solicita a norma.

Figura 16: Timer utilizado para a conversão dos ciclos para tempo

FONTE: AUTORES, 2018

Para retificação do anel de borracha foi utilizada uma lixa de 280 mesh, 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 verificado antes do início dos ensaios, através da pesagem da quantidade de abrasivo que passou pelo bico dosador durante um minuto. Este ficou mantido entre 300 a 400 gramas por minuto, conforme estabelece a norma ASTM G 65-16.

Figura 17 – Execução do ensaio

FONTE: AUTORES, 2018

Antes da realização de cada ensaio a roda de borracha foi retificada e 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.

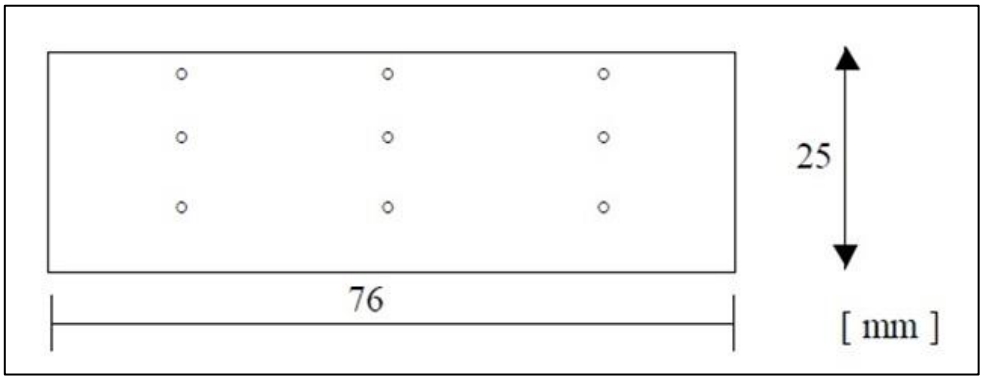
### 4.3.3 Ensaio de dureza

Após a realização dos ensaios de resistência a abrasão, os corpos de prova foram novamente retificados e polidos, de forma a evitar discrepâncias na execução dos ensaios de dureza devido a superfície desgastada.

Antes da realização dos ensaios, o equipamento foi aferido com corpos de prova de dureza padronizada.

Os ensaios foram realizados no laboratório do Instituto Federal do Espirito Santo campus Aracruz/ES. As medidas de dureza foram realizadas na face do revestimento e a escala de determinação foi a Rockwell C.

Figura 18 – Esquema representativo das medidas de dureza.




FONTE: AUTORES, 2018.

Os ensaios de resistência à abrasão a baixa tensão e dureza foram realizados na camada de revestimento. Foi verificado uma espessura média de 15mm para os corpos de prova com os revestimentos, e após os ensaios de resistência a abrasão, os corpos de prova foram novamente retificados e polidos. Ao se consultar o apêndice C, verifica-se que todas as medições realizadas então próximas a dureza do metal de adição. Em resumo, é possível afirmar que nenhum ensaio foi realizado no substrato.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior, serão apresentados a seguir.

Inicialmente são expostos os resultados experimentais referentes aos ensaios de resistência ao desgaste por abrasão em amostras revestidas por uma camada depositadas por processo de soldagem com eletrodo revestido XHD 6710 da Eutectic e Castolin.

A seguir, são apresentados os resultados de dureza do revestimento.

## 5.1RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Os resultados da resistência ao desgaste por abrasão à baixa tensão (perda de volume em mm³), para os depósitos realizados com corrente de 100 A, 120A, 140A, 160A e 180 A, com suas respectivas velocidades de soldagem e tensão são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Perda de massa (g) e perda de volume ajustado (mm³) em função da corrente de soldagem (A).

| **Corrente (A)** | **100A** | **120A** | **140A** | **160A** | **180A** |
|---|---|---|---|---|---|
| Tensão (V) | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| Velocidade média soldagem (mm/min) | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Aporte térmico (KJ/mm) | 0,58 | 0,70 | 0,81 | 0,93 | 1,04 |
| Perda de massa (g) | 0,035 | 0,078 | 0,143 | 0,631 | 0,850 |
| Perda de volume (mm³) | 4,472 | 10,012 | 18,450 | 81,539 | 111,093 |

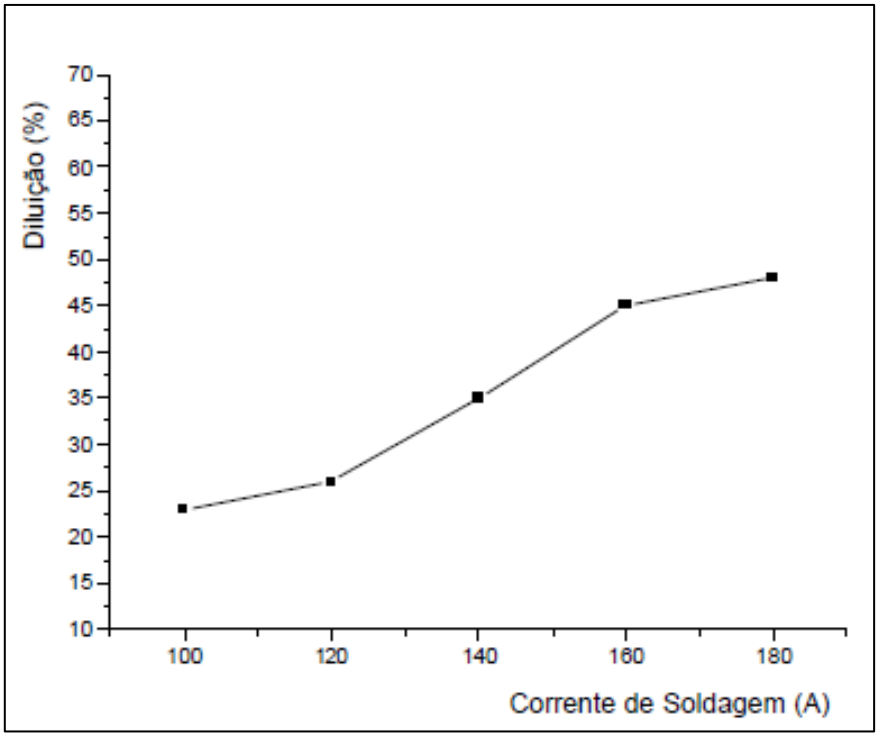
FONTE: AUTORES (2018)

A partir da tabela 7 é possível observar que com o aumento da corrente de soldagem ocorre um aumento considerável da perda de volume.

Os resultados de resistência a abrasão obtidos se aproximam com os encontrados por

RIBEIRO (2004). Segundo ele, o aumento da corrente de soldagem resulta no aumento da perda de volume, esta relação é devido ao aumento da taxa de diluição, que propicia a formação de microestruturas com baixa fração volumétrica de carbonetos primários de Cromo.

Gráfico 3 – Relação entre corrente de soldagem e diluição.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

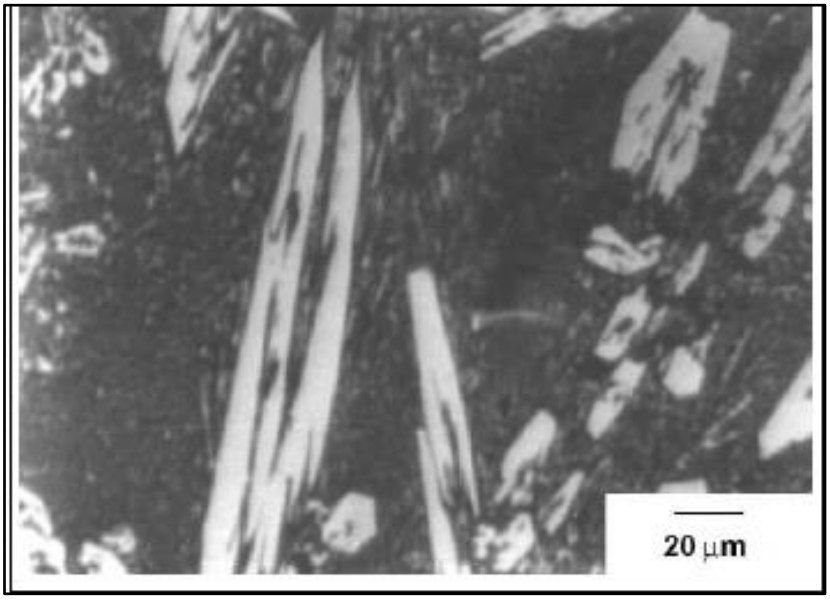
Segundo FIORE et al, a fração volumétrica de carbonetos é um dos mais importantes fatores que afetam a resistência ao desgaste abrasivo. Por outro lado, o alto nível de dureza dos carbonetos do tipo $M_7C_3$ os torna frágeis, e o modo pelo qual estão presos na matriz pode propiciar ou não a ocorrência de trincas durante o desgaste.

Segundo as análises micro estruturais realizadas por RIBEIRO (2004), com o mesmo tipo de revestimento e intensidades de corrente deste estudo, as amostras apresentaram os seguintes comportamentos:

A amostra com 100A apresentou estrutura hipereutética com base na composição química do eletrodo (42% Cr e 5,3% C). Pela micrografia, verificou-se a presença de

carbonetos primários muito grandes do tipo $M_7C_3$ precipitados na matriz eutética. (Figura 19).

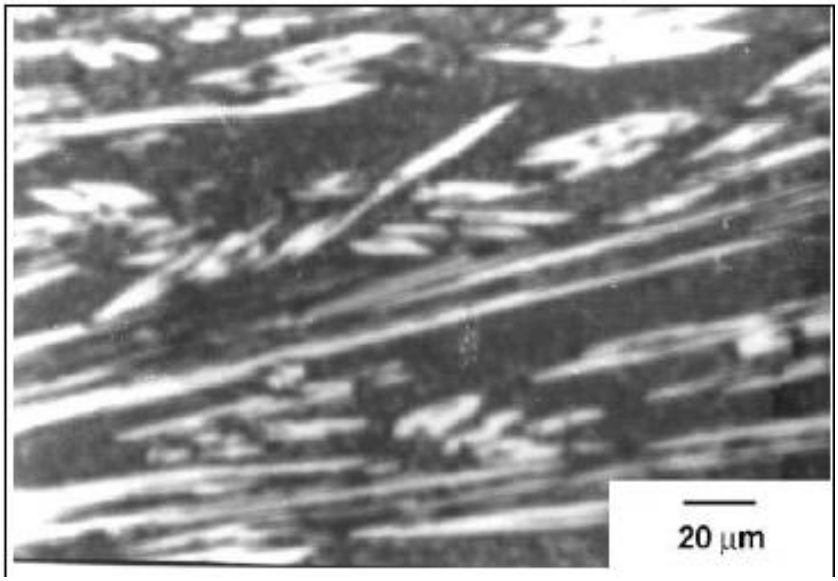
Figura 19 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 100A. Aumento 250 X.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

A amostra com 120A também apresentou estrutura hipereutética com base na composição química do eletrodo (42% Cr e 5,3% C). Pela análise de micrografia, constatou-se uma concentração de carbonetos primários, além de uma grande fração volumétrica de carbonetos secundários. (Figura 20).

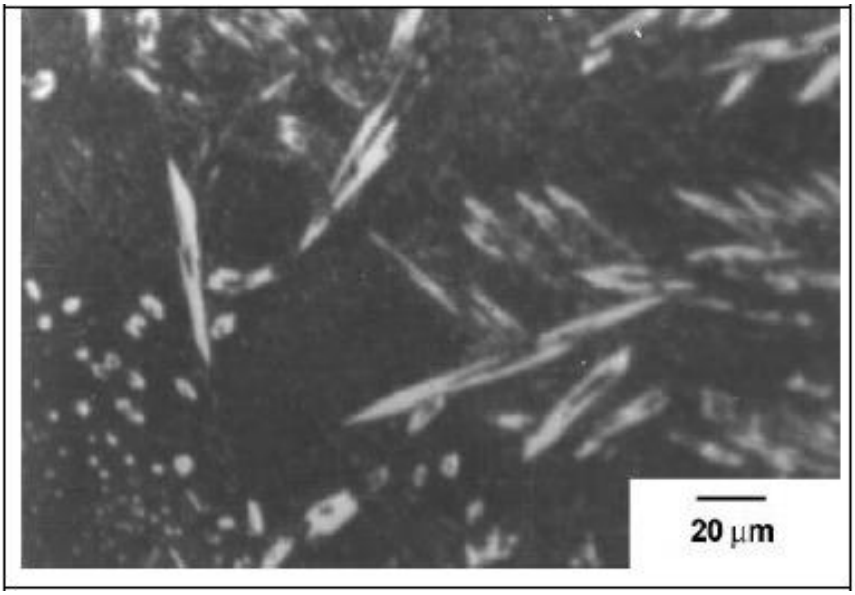
Figura 20 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 120A. Aumento 250 X.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

A amostra com 140A apresentou uma microestrutura intermediária, quanto ao tamanho e fração volumétrica dos carbonetos. Verificou-se a presença de uma fração volumétrica muito grande dos carbonetos secundários e pequena quantidade de carbonetos primários dispersos na matriz. (Figura 21).

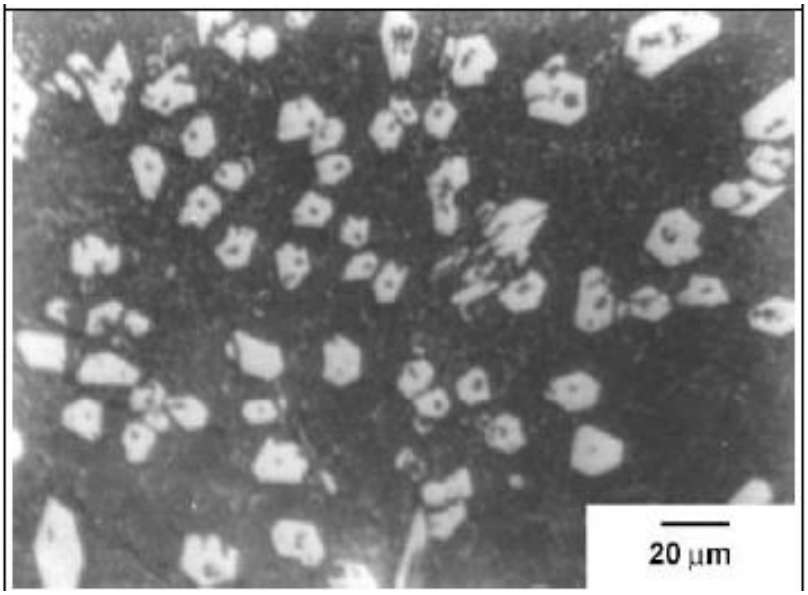
Figura 21 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 140A. Aumento 250 X.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

A amostra com 160A, o revestimento apresentou alta taxa de diluição com o metal de base, sugerindo a formação de uma estrutura hipoeutética composta de carbonetos secundários numa matriz eutética de austenita. Verificou-se pequena fração volumétrica de carbonetos secundários e a presença de poucos carbonetos primários dispersos na matriz. (Figura 22).

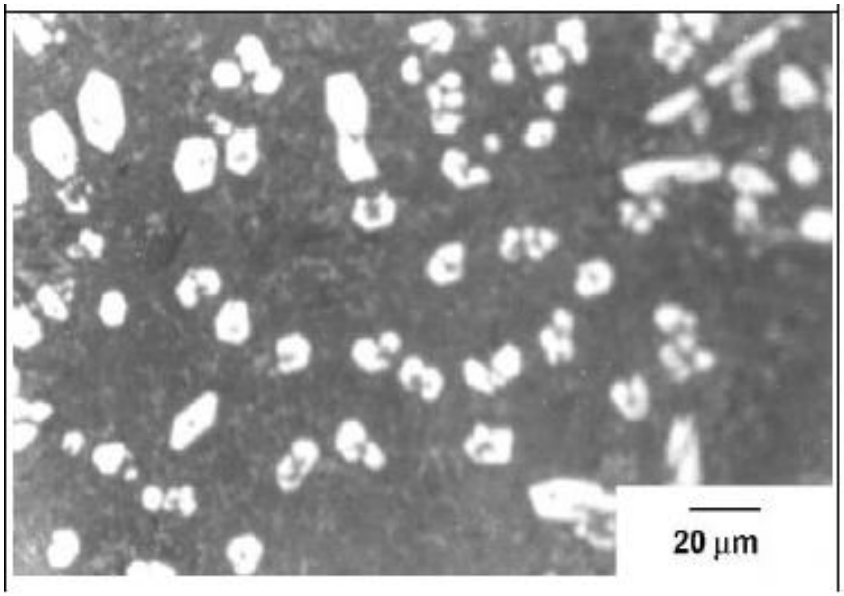
Figura 22 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 160A. Aumento 250 X.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

Já a amostra com 180A, o revestimento também apresentou alta taxa de diluição com o metal de base, sugerindo a formação de uma estrutura hipoeutética composta de carbonetos secundários numa matriz eutética de austenita e verificou-se uma fração volumétrica muito pequena de carbonetos secundários dispersos na matriz. (Figura 23).

Figura 23 – Microestrutura do revestimento depositado do corpo de prova 180A. Aumento 250 X.




FONTE: RIBEIRO, 2004.

## 5.2 DUREZA

Os resultados obtidos com a medição de dureza são apresentados na Tabela 8, a seguir:

Tabela 8 – Ensaio de dureza Rockwell C.

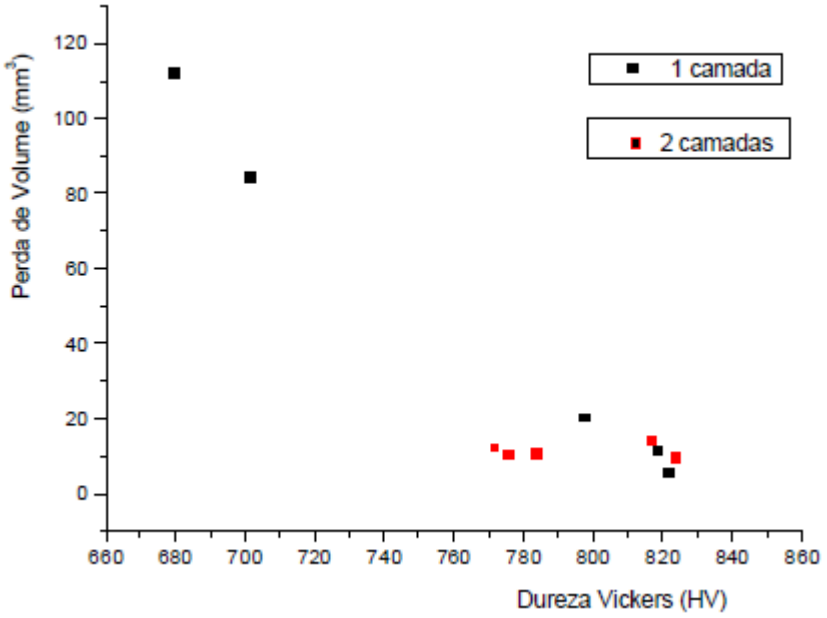
| **Corrente** | **100 A** | **120 A** | **140 A** | **160 A** | **180 A** |
|---|---|---|---|---|---|
| Escala | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC |
| Medição | | | | | |
| 1 | 62,6 | 60,3 | 59,9 | 57,9 | 57,4 |
| 2 | 60,6 | 60,9 | 61,4 | 59,7 | 57,7 |
| 3 | 61,2 | 62,2 | 59,0 | 59,3 | 59,1 |
| 4 | 62,8 | 60,7 | 59,6 | 58,9 | 58,1 |
| 5 | 63,4 | 61,6 | 58,8 | 58,8 | 59,5 |
| 6 | 63,8 | 61,1 | 60,7 | 58,7 | 59,0 |
| **Médias** | **62,4** | **61,1** | **59,9** | **58,9** | **58,5** |

FONTE: AUTORES (2018)

Com os resultados obtidos é possível observar uma relação entre a dureza e a resistência ao desgaste por abrasão. Porém ao se reportar aos estudos de outros autores, esta relação não é adequada.

RIBEIRO (2004) ao avaliar o revestimento com uma e duas camadas, verificou que as amostras com duas camadas obtiveram um resultado mais aleatório de resistência ao desgaste, do que com uma camada. Não apresentando nenhuma relação com a dureza.

Grafico 4 – Perda de volume (mm³) em função da Dureza (HV).




FONTE: RIBEIRO, 2004.

Estes resultados também são apontados por KOTECKI & OGBORN (1995), que após estudar a soldagem de revestimento com uma e duas camadas, verificou uma maior dureza no revestimento de duas camadas, porém, a resistência ao desgaste foi quatro vezes menor quando comparada com o de uma camada.

DIAS & GOMES (2003), desenvolveram um estudo de resistência a abrasão a baixa tensão de revestimentos soldados por arco submerso, e também concluíram que a dureza não afetou a resistência a abrasão das amostras. Para REBELLO et all (1987), uma das explicações para se evitar relacionar a dureza com a resistência a abrasão, é

que os ensaios de dureza convencionais são quase-estáticos, diferentes das condições onde a superfície revestida é atingida por partículas abrasivas em velocidades relativamente elevadas.

# 6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que, tomando como constantes os parâmetros de velocidade e voltagem, o aumento da intensidade da corrente de soldagem diminui a resistência à abrasão a baixa tensão para revestimentos com o eletrodo XHD 6710.

Também pode-se concluir que o melhor resultado de resistência a abrasão a baixa tensão obtidos para os revestimentos soldados com Eletrodo XHD 6710 foi com a intensidade de corrente de soldagem em 100A.

Além disso, embora alguns autores corroborar que a dureza de revestimento não é o melhor indicativo de resistência a abrasão a baixa tensão, neste estudo os resultados apresentaram uma relação direta.

# 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


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

ASTM G40-09. **Standart Terminology Relating to Wear and Erosion.** 1992.

BRANDIM, A. de S.; ALCÂNTARA, N. G.; HERNANDEZ, O.J.S.; PARANHOS, R. P.R. **Resistência ao Desgaste por abrasão em metal de solda do tipo Fe-C-Cr, obtidos por arco submerso.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia-MG, 2003.

BUDINSKI, K. G. HARDFACING, V. **Choosing a Process. Welding Design & Fabrication**. p.75-78, mar. 1987.

CASTRO, C. A. F. **Resistência do desgaste abrasivo das sapatas de trator de esteira após processos de recuperação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

**Catálogo aços para construção mecânica – TENAX.** Disponível em: <http://www.tenax.com.br/tenax/wp-content/themes/rocco/pdfs/acos-para-construcao-mecanica/Catalogo_Construcao_Mecanica.pdf> Acesso em: 21 de Abril de 2018.

**Catálogo XHD 6710 – EUTECTIC CASTOLIN.** Disponível em: < http://www.eutectic.com.br/catalogos/xhd-6710.pdf> Acesso em: 21 de Abril de 2018.

CORRÊA, E.O.; ALCÂNTARA, N.G.; TECCO, D.G.; KUMMAR, R.V. **Desenolvimento De Uma Liga Ferrosa para a Solda de Revestimento Duro Reforçada com Carbonetos Complexos.** IV Congresso Nacional de Engenharia Mecância. 22 a 25 de Agosto. Recife, PE. 2006

DAVIS, V. H. BOLTON, L. A. **The mechanism of wear. In: Weld, Sufacing and Hardfacing.** The Welding Institute. 1980. 88p.

Deutsches Institut für Normung. **DIN 50320: VERSCHELPSS - Begriffe, Analyse von Verleipvorgangen, Gliedrung desgaste Verliepgebietes**. Beuth Verlog, Berlin, 1979.

DIAS, M.F. MARTINS & GOMES, S.I. NOVAES. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão de revestimentos soldados por arco submerso**. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2003.

EYRE, T. S. **Friction and Wear Mechanisms.** ABM. II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste. Uberlândia – MG. p. 263-306; dez. 1991.

FERRARINI, C. F. **Análise da resistência ao desgaste abrasivo de um revestimento duro obtido pela deposição, por soldagem, de uma liga a base de ferro.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

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

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

GREGOLIN, J. A. R. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) Resistentes ao Desgaste.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

HARWORTH, R. D. Jr. **The abrasion resistance of metals Transactions of the A. S. M.** v.41, 1949.

HERNÁNDEZ, O. J. S. **Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indútria Sucroalcooleira.** Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 102 p. 1997.

HUTCHINGS, I. e SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** 2ª ed., London: Edward Arnol, 1992.

KASSIM S. A. **Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys.** Wear 243. p. 92-100. 2000.

KOTECKI, D.J. & OGBORN, J.S. **Abrasion Resistance of Iron-Based Harfacing Alloys**. Welding Journal, EUA. 1995.

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

MACHADO, J. M. O. **Análise de Falhas em Martelos Oscilantes dos Desfibradores da Indústria Sucroalcooleira da Região Norte-Nordeste.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

MARINO, P. S. PATRONE, J. BORTONI, O. E. **Recargue por Soldadura de Superficies Submetidas a Desgaste.** In: Congresso Argentino de Soldadura. Vn, T.I, P.I.I-71. Buenos Aires, 1988.

**Metals Handbook Desk Edition.** CRC Press, 2ª Ed., 1998.

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

MOORE, M. A. **A review of two-body abrasive wear.** Wear, 1974.

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

**Revista Inovação nº4 – Eutectic Castolin, 2013.** Disponível em: http://www.eutectic.com.br/catalogos/revista-inovacao-04.pdf>. Acesso em: 21 de Abril de 2018.

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.

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

STOETERAU, R. L. **Tribologia.** Universidade Federal de Santa Catarina. Apostila, p. 172. 2004.

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

TYLCZAC, J. H. **Abrasive Wear.** ASM Handbook Friction, Lubrification and Wear Technology, Vol. 18, 1992.

WAINER, E. & BRANDI, D.S. & HOMEN, F.D. **Soldagem Processos e Metalurgia.** São Paulo. Ed. Edgard Blucher. 1992.

ZUM GAHR, K-H. **Microstructure and wear of materials.** New York: Elsevier, v.10. (Tribology series). 1987.

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

Tabela 9 – Perda de massa associada ao desgaste.

| PERDA DE MASSA (g) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **CORRENTE** | **CORPO DE PROVA** | **MASSA INICIAL (g)** | **MASSA FINAL(g)** | **PERDA DE MASSA (g)** | **MÉDIA PERDA DE MASSA(g)** | **DESVIO PADRÃO** |
| **100 A** | 1 | 159,147 | 159,112 | 0,035 | 0,035 | 0,002 |
| | 2 | 159,201 | 159,168 | 0,033 | | |
| | 3 | 161,516 | 161,479 | 0,037 | | |
| **120 A** | 4 | 160,589 | 160,503 | 0,086 | 0,078 | 0,008 |
| | 5 | 159,206 | 159,129 | 0,077 | | |
| | 6 | 162,865 | 162,794 | 0,071 | | |
| **140 A** | 7 | 155,966 | 155,812 | 0,154 | 0,143 | 0,014 |
| | 8 | 165,973 | 165,845 | 0,128 | | |
| | 9 | 164,564 | 164,416 | 0,148 | | |
| **160 A** | 10 | 149,986 | 149,349 | 0,637 | 0,631 | 0,024 |
| | 11 | 150,713 | 150,108 | 0,605 | | |
| | 12 | 148,646 | 147,995 | 0,651 | | |
| **180 A** | 13 | 156,248 | 155,378 | 0,870 | 0,855 | 0,017 |
| | 14 | 153,481 | 152,624 | 0,857 | | |
| | 15 | 154,920 | 154,083 | 0,837 | | |

FONTE: AUTORES, 2018

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

Tabela 10 – Perda de volume ajustado associada ao desgaste.

| PERDA DE VOLUME AJUSTADO (mm³) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CORRENTE** | **CORPO DE PROVA** | **DIÂMETRO DA RODA INICIAL (mm)** | **DIÂMETRO DA RODA APÓS O USO (mm)** | **PERDA DE VOLUME (mm³)** | **PERDA DE VOLUME AJUSTADO (mm³** | **MÉDIA PERDA DE VOLUME AJUSTADO** | **DESVIO PADRÃO** |
| **100 A** | 1 | 228,6 | 228,2 | 4,459 | 4,466 | 4,472 | 0,258 |
| | 2 | 228,6 | 227,9 | 4,204 | 4,217 | | |
| | 3 | 228,6 | 227,7 | 4,713 | 4,732 | | |
| **120 A** | 4 | 228,6 | 227,1 | 10,955 | 11,028 | 10,012 | 0,960 |
| | 5 | 228,6 | 226,8 | 9,809 | 9,887 | | |
| | 6 | 228,6 | 226,7 | 9,045 | 9,120 | | |
| **140 A** | 7 | 228,6 | 226,5 | 19,618 | 19,800 | 18,450 | 1,745 |
| | 8 | 228,6 | 226,2 | 16,306 | 16,479 | | |
| | 9 | 228,6 | 226 | 18,854 | 19,070 | | |
| **160 A** | 10 | 228,6 | 225,6 | 81,146 | 82,226 | 81,596 | 3,062 |
| | 11 | 228,6 | 225,1 | 77,070 | 78,268 | | |
| | 12 | 228,6 | 224,9 | 82,930 | 84,294 | | |
| **180 A** | 13 | 228,6 | 224,3 | 110,828 | 112,953 | 111,093 | 2,040 |
| | 14 | 228,6 | 224,0 | 109,172 | 111,414 | | |
| | 15 | 228,6 | 223,8 | 106,624 | 108,911 | | |

FONTE: AUTORES, 2018

## APENDICE C – RESULTADOS DE DUREZA

Tabela 11 – Dureza.

| RESULTADOS DE DUREZA | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CORRENTE** | **CORPO DE PROVA** | **DUREZA HRC** | | | | | | **MÉDIA HRC** |
| **100 A** | 1 | 63,2 | 60,7 | 62,9 | 63,9 | 62,1 | 66,7 | 62,4 |
| | 2 | 61,7 | 61,6 | 59,4 | 62,2 | 63,2 | 61,5 | |
| | 3 | 62,8 | 59,5 | 61,3 | 62,4 | 64,9 | 63,1 | |
| **120 A** | 4 | 59,8 | 61,8 | 62,9 | 60,1 | 61,8 | 61,2 | 61,1 |
| | 5 | 60,7 | 61,3 | 61,8 | 59,9 | 61,2 | 59,2 | |
| | 6 | 60,5 | 59,7 | 61,8 | 62,0 | 61,8 | 62,7 | |
| **140 A** | 7 | 58,3 | 61,4 | 58,5 | 59,8 | 58,8 | 60,8 | 59,9 |
| | 8 | 60,9 | 62,1 | 58,9 | 60,7 | 57,7 | 60,3 | |
| | 9 | 60,6 | 60,7 | 59,6 | 58,3 | 60,0 | 61,1 | |
| **160 A** | 10 | 59,4 | 61,8 | 60,0 | 60,7 | 58,9 | 58,1 | 58,9 |
| | 11 | 58,6 | 59,7 | 58,6 | 57,3 | 59,3 | 61,5 | |
| | 12 | 55,6 | 57,6 | 59,4 | 58,8 | 58,2 | 56,2 | |
| **180 A** | 13 | 57,2 | 58,3 | 58,3 | 57,7 | 60,8 | 58,1 | 58,5 |
| | 14 | 58,2 | 59,4 | 61,4 | 57,8 | 59,2 | 61,5 | |
| | 15 | 56,8 | 55,4 | 57,6 | 58,8 | 58,6 | 57,5 | |

FONTE: AUTORES, 2018