



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Pedro Augusto Ramos

Avaliação do desgaste superficial por abrasão de materiais metálicos para revestimento no processamento e extração de agregados minerais

Belo Horizonte

Julho de 2018



Pedro Augusto Ramos

Avaliação do desgaste superficial por abrasão de materiais metálicos para revestimento no processamento e extração de agregados minerais

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador: Prof. MSc. Carlos Eduardo dos Santos

Belo Horizonte

Julho de 2018

Ramos, Pedro Augusto.
R175a Avaliação do desgaste superficial por abrasão de materiais metálicos para revestimento no processamento e extração de agregados minerais / Pedro Augusto Ramos. - 2018.
74 f. : il., fotos, graf., tabs.
Orientador: Ernane Rodrigues da Silva.
Co-orientador: Carlos Eduardo dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.

Bibliografia.

1. Aço de alta resistência. 2. Revestimento de superfície. 3. Desgaste abrasivo. 4. Carbonetos. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Santos, Carlos Eduardo dos. III. Título.

CDD: 620.11292

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Avaliação do desgaste superficial por abrasão de materiais metálicos para revestimento no processamento e extração de agregados minerais

Dissertação apresentada em 31 de Julho de 2018 por Pedro Augusto Ramos, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. MSc. Carlos Eduardo dos Santos (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.^a Dr.^a Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (MEMBRO INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito (MEMBRO EXTERNO)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC MINAS

Belo Horizonte

31 de Julho de 2018

Dedico este trabalho à Deus, que sempre me guiou e me suportou para que eu chegasse até aqui. Em especial a minha futura esposa, Amanda, que me prestou todo suporte emocional durante à realização do mesmo. À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, a Virgem Maria e à São Paulo da Cruz (meu Santo de devoção) por estarem sempre olhando por mim em todos os momentos da minha vida, não só na execução deste trabalho mas nos caminhos que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado e por terem me estimulado à esta conquista.

À minha futura esposa Amanda que sempre me acolheu com todo carinho do qual eu necessitava.

À toda minha família pelo apoio e compreensão.

Em especial aos meus amigos que cada qual de sua forma, contribuíram para realização deste sonho.

Ao amigo, Vanildo Borges, pela presteza na disponibilização dos recursos necessários para executar o trabalho.

Ao amigo, Edvan José Ribeiro, em conjunto com a empresa Tecborr pela presteza na realização da vulcanização para os ensaios de desgaste.

Ao meu orientador Ernane Rodrigues da Silva, pela paciência, compreensão e dedicação em acompanhar este trabalho.

Ao meu coorientador Carlos Eduardo dos Santos por me apoiar internamente na instituição e me ajudar na realização dos ensaios de desgaste.

A todos os meus professores pelos conhecimentos transferidos e recursos disponibilizados, em especial, ao professor Pedro Paiva Brito pelas orientações ao longo desta caminhada e à professora Maria Celeste pelas contribuições durante a banca examinadora.

Ao CEFET-MG e a PUC MINAS por disponibilizar toda estrutura do qual necessitei para execução deste trabalho.

Amar verdadeiramente significa amar o que é difícil de ser amado, do contrário não será virtude alguma, perdoar verdadeiramente significa perdoar o imperdoável, do contrário não será virtude alguma, ter fé de verdade significa crer no inacreditável, do contrário não será virtude alguma e esperar de verdade significa esperar quando já não há esperança, do contrário não será virtude alguma.

G.K.Chesterton

RESUMO

Os agregados minerais apresentam características interessantes para diversas aplicações, sua extração e processamento dependem dos processos de mineração, onde ocorrem elevadas taxas de desgaste. O desgaste como a variável que representa custo deve ser minimizado de qualquer forma, aumentando assim os índices de lucratividade e diminuindo manutenções, e com isso proporcionando maior vida útil de máquinas e equipamentos. Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre o desgaste de revestimentos metálicos, obtidos comercialmente, sendo estes: aços de alta resistência à abrasão baixa liga ao boro com diferentes classes de dureza (AR) e liga *hardfacing* rica em cromo depositada por soldagem. Ambos revestem equipamentos nas etapas de extração e processamento de minerais. Os revestimentos foram avaliados quanto a sua microestrutura, dureza e composição química. Foram realizados ensaios de desgaste por abrasão segundo a norma ASTM G65 (Roda de borracha) com areia quartzosa número 50, e analisadas as propriedades de resistência ao desgaste por abrasão de cada revestimento ensaiado. Os desempenhos dos revestimentos testados foram verificados por meio da perda de massa no ensaio abrasivo e pela análise de microscopia eletrônica de varredura, onde foram identificados micro mecanismos de desgaste. Os micro mecanismos de desgaste observados estão ligados ao tipo de microestrutura e dureza dos revestimentos, variando entre micro corte e micro trincamento. A liga *hardfacing* rica em cromo apresentou a maior resistência abrasiva comparado aos aços martensíticos baixa liga ao boro, porém apresentando um comportamento frágil e com surgimento de trincas. Este efeito pode afetar o desempenho do material em condições operacionais com impacto.

Palavras-chave: Aços baixa liga ao boro, revestimento duro, chapas de desgaste, ensaio de roda de borracha.

ABSTRACT

The mineral aggregates has interesting characteristics for several applications, their extraction and processing depend on the mining processes, where high wear rates occur. Wear as the variable that represents cost must be minimized in any way, thus increasing profitability indices and decreasing maintenance, thereby providing longer machine and equipment life. In this work, a study was carried out on the wear of metallic coatings, obtained commercially, being: high abrasion resistant low alloy boron steels with different hardness classes (AR) and hardfacing rich chromium alloy deposited by welding. Both coat equipment in the stages of mineral extraction and processing. The coatings were evaluated for their microstructure, hardness and chemical composition. Abrasive wear tests were performed according to ASTM G65 (Rubber Wheel) with quartz sand number 50, and the abrasion resistance properties of each tested coating were analyzed. The performances of the coatings tested were verified by means of the mass loss in the abrasive test and by scanning electron microscopy, where micro wear mechanisms were identified. The micro wear mechanisms observed were related to the microstructure type and hardness of the coatings, varying between micro-cutting and micro-cracking. The high hardness hardfacing rich chromium alloy presented higher abrasive resistance than martensitic low alloy boron steels, but presenting a brittle and cracking behavior. This effect can affect material performance under impact operating conditions.

Key-words: Low alloy boron steels, hardfacing, wear plates, dry sand-rubber wheel test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas de desgaste em processamento mineral, a) Desgaste deslizante; b) Desgaste por impacto; c) Desgaste por compressão.	21
Figura 2 - Desgaste abrasivo em função da taxa entre as durezas das partículas abrasivas e a dureza do material	24
Figura 3 – Micro mecanismos de desgaste: a) Micro corte, b) Micro sulcamento e c) Micro trincamento.....	25
Figura 4 - Gráfico dos micro mecanismos de desgaste abrasivo associados com as variações da resistência à abrasão e dureza.....	26
Figura 5 – Imagem de MEV de micro mecanismos de desgaste.....	26
Figura 6 - Mecanismo de abrasão à dois corpos	27
Figura 7 - Mecanismo de abrasão à três corpos.....	28
Figura 8 – Imagem da vista interna de um chute	30
Figura 9 – Esquema de fabricação da chapa revestida Fe-C-Cr por soldagem.....	33
Figura 10 - Desgaste acentuado em segmento externo de caçamba carregadeira devido ao maior movimento relativo.....	41
Figura 11 - Fluxograma de ensaios.....	44
Figura 12 – Desenho do corpo de prova utilizado para ensaio de desgaste, em milímetros.....	45
Figura 13 - Máquina roda de borracha.....	48
Figura 14 - Vista interna da máquina para ensaio roda de borracha	48
Figura 15 - Durômetro portátil Shore - Marca Kori Seiki MFG, Tipo: A e borracha natural anti-abrasiva, Dureza: 60 Shore A	49
Figura 16 – a) Imagem de Microscopia óptica da dureza da matriz próximo a interface com substrato b) Imagem de Microscopia óptica da dureza individual matriz/carboneto – Chapa Bi-metálica	52
Figura 17 - Resultados da Micro dureza (HBW), Micro durômetro HV	53
Figura 18 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR450 – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura ampliada da amostra AR450 – 2500x	54

Figura 19 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR500 – 1000x	
b) Imagem de MEV da microestrutura ampliada da amostra AR500 – 2500x	54
Figura 20 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR600 – 1000x	
b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR600 – 2500x.....	55
Figura 21 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra bi-metálica –	
1000x b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra bi-metálica – 2500x	56
Figura 22 – a) Imagem de análise por Energia dispersiva (EDS) de carboneto de	
cromo b) Imagem de análise por Energia dispersiva (EDS) de matriz austenítica ...	57
Figura 23 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra ASTM A-36 –	
1000x b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra ASTM A-36 – 2500x	
.....	57
Figura 24 – a) Imagem de MEV da morfologia dos grãos de areia – como recebido.	
b) Imagem de MEV da morfologia dos grãos de areia – pós-ensaio ASTM G-65	59
Figura 25 – Corpos de prova provenientes do ensaio ASTM G-65: a) AR450, b)	
AR500, c) AR600, d) Bi-metálico e e) ASTM A-36.....	60
Figura 26 - – Perda Volumétrica por liga ensaiada – ASTM G-65	61
Figura 27 – a) Imagem de MEV da amostra A-36 – Ampliação de 100x b) Imagem	
de MEV da amostra A-36 – Ampliação de 250x	62
Figura 28 – Amostra A-36 – Ampliação de 1000x.....	62
Figura 29 – a) Imagem de MEV da amostra AR450 – Ampliação de 100x b) Imagem	
de MEV da amostra AR450 – Ampliação de 500x	63
Figura 30 – a) Imagem de MEV da amostra AR500 – Ampliação de 100x b) Imagem	
de MEV da amostra AR500 – Ampliação de 400x	64
Figura 31 – a) Imagem de MEV da amostra AR600 – Ampliação de 100x b) Imagem	
de MEV da amostra AR600 – Ampliação de 500x	65
Figura 32 – a) Imagem de MEV da amostra Bi-metálica – Ampliação de 100x b)	
Imagem de MEV da amostra Bi-metálica – Ampliação de 500x	65
Figura 33 – Imagem de MEV análise por Energia dispersiva (EDS) carboneto de	
cromo – Ampliação de 500x.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para ensaio de macro dureza	45
Tabela 2 – Parâmetros para ensaio de desgaste	47
Tabela 3 – Parâmetros para ensaio de microscopia eletrônica de varredura	49
Tabela 4 – Composição química por espectrometria óptica	50
Tabela 5 - Resultados da macro dureza (HBW), Durômetro Rockwell	51
Tabela 6 - Distribuição Granulométrica areia – Antes dos ensaios.....	58
Tabela 7 – Distribuição Granulométrica areia – Após os ensaios.....	58
Tabela 8 - Perda volumétrica (mm ³) por liga ensaiada no ensaio abrasivo.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SSAB	Swedish Steel AB (Aço Sueco AB)
M ₇ C ₃	Tipo de carboneto primário à base de cromo
HBW	Hardness Brinell (Dureza Brinell)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Associação americana de testes e materiais)
FCAW	Flux-cored arc welding (Soldagem à arco com arames tubulares)
CCO	Complex Carbides overlay (Revestimento de carbonetos complexos)
N	Newton
MEV	Microscopia eletrônica de Varredura
g	grama
Min	minuto
g/min	gramas por minuto
DMC	Dimensão máxima característica
NM	Norma Mercosul
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
NBR	Norma Brasileira
EDS	Energy dispersive spectroscopy (Espectroscopia de energia)
Wt%	Percentual de peso
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Desgaste	20
3.2	Formas de desgaste e ensaios	21
3.3	Tipos de desgaste	22
3.4	Desgaste por abrasão e mecanismos de desgaste	23
3.4.1	Micro corte e Micro sulcamento	25
3.4.2	Micro trincamento	27
3.4.3	Abrasão à dois corpos	27
3.4.4	Abrasão à três corpos	28
3.5	Revestimentos	30
3.5.1	Aços	31
3.5.1.1	Aços baixa liga ao boro	31
3.5.2	Ligas do tipo carboneto de cromo (<i>hardfacing</i>)	32
3.6	Sistema Tribológico	35
3.7	Fatores que influenciam a resistência ao desgaste por abrasão	35
3.7.1	Influência da Microestrutura e dos elementos de liga	35
3.7.2	Influência da dureza	38
3.7.3	Influência da tenacidade	39
3.7.4	Influência do movimento relativo entre partícula e revestimento	40
3.7.5	Influência do tamanho, forma e dureza do abrasivo	41
4	METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)	43
4.1	Corpos de prova	44
4.2	Revestimentos	45
4.2.1	Composição Química	45
4.2.2	Macro Dureza e Micro dureza Vickers	45

4.2.3	Microestrutura.....	46
4.3	Abrasivo.....	46
4.3.1	Classificação granulométrica do abrasivo	46
4.4	Ensaio de desgaste	47
4.4.1	Análise dos micro mecanismos e da morfologia das amostras	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1	Revestimentos	50
5.1.1	Composição Química	50
5.1.2	Macro e Micro Dureza.....	51
5.1.3	Microestrutura.....	53
5.2	Abrasivo.....	58
5.2.1	Granulometria	58
5.2.2	Morfologia	59
5.3	Ensaio de desgaste por abrasão (ASTM G65-16).....	59
5.3.1	Taxas de desgaste (perda de massa)	59
5.3.2	Micro mecanismos de desgaste (MEV)	61
6	CONCLUSÃO.....	68
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

A extração mineral é uma atividade importante e estratégica que movimentaria potencialmente a economia brasileira. Em 2015, ela representou 5% do PIB nacional (IBRAM, 2015). Portanto, os estudos relacionados à extração mineral têm importância significativa no aprimoramento da técnica, promovendo novas tecnologias que impactam positivamente na economia do setor.

Os minerais podem ter aplicação na indústria de construção, cimento, mecânica, produção de alimentos, purificação e tratamento de esgotos, refino de açúcar, aeronáutica, fabricação de vidro, aço, papéis, plásticos, tintas, cerâmicas e tantos outros (SAMPAIO, 2005).

Para o processamento e extração de minerais, é necessário lidar com o fenômeno de desgaste, que segundo Zum Ghar (1987) é um dano gerado nas superfícies, envolvendo perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre elas. Este fenômeno pode acontecer em máquinas, equipamentos, ferramentas de usinagem e demais componentes sujeitos à abrasão.

Os equipamentos sofrem prejuízos consideráveis conforme registrado no Relatório Jost, o qual apresentou ao mundo a tribologia como ciência da engenharia responsável por explicar os prejuízos com a não proteção das superfícies e como minimizar o desgaste (JOST, 1966).

A tribologia, ciência que estuda o movimento relativo entre superfícies envolvendo a investigação científica e conhecimentos práticos, estuda o sistema e os mecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987). O desgaste abrasivo e os principais micro mecanismos de desgaste conhecidos pela comunidade científica são: micro sulcamento, micro corte e micro trincamento.

Os estudos tribológicos são ferramentas que analisam os danos causados pelo desgaste, e os relacionam com os micro mecanismos. Estes estudos mostram a quantidade de variáveis que afetam este processo, sendo difícil determinar todas as causas reais de um mecanismo de desgaste, o que faz necessário investimentos em pesquisas. (ZUM GAHR, 1987).

A indústria, já utiliza diversos materiais resistentes ao desgaste abrasivo a fim de proteger máquinas e equipamentos, porém sem um critério claro de seleção destes

materiais (fato este, que foi evidenciado no relatório Jost através da quantificação das perdas financeiras e também é observado no cotidiano das empresas na atualidade).

Na extração de minerais, o desgaste é influenciado pelas propriedades mecânicas das rochas, como porosidade, abrasividade, pelas propriedades dos revestimentos, em especial dureza e microestrutura e também pela forma de interação entre agregados e revestimento. Segundo Evans (1966), quanto mais porosa a rocha mais frágil é a mesma, fazendo com que a rocha possua uma resistência mecânica menor, sendo então capaz de causar menor desgaste em algumas situações de processamento como no desgaste por compressão.

A abrasividade também desempenha um papel importante no desgaste. Segundo Petrica (2013), a maneira mais comum de se determinar a abrasividade de uma rocha é descobrindo a composição mineralógica, em particular a contribuição de minerais duros como quartzo e feldspato.

Os materiais, de forma geral, são convencionalmente agrupados, segundo a sua composição química, estrutura atômica e divididos em três grandes grupos: metais, cerâmicas e polímeros (CALLISTER JR., 2007), que podem ser aplicados como revestimentos. Dentre os revestimentos utilizados atualmente, ressaltam-se os materiais metálicos com alta resistência ao desgaste abrasivo (aços baixa liga martensíticos ao boro) e revestimentos duros depositados por soldagem, por apresentarem ampla utilização na indústria.

Os aços são materiais metálicos versáteis devido a sua elevada gama de propriedades mecânicas, presentes em grande parte dos produtos utilizados de tal forma que constituem um dos mais importantes grupos de materiais empregados na indústria. A crescente necessidade de melhoria das propriedades mecânicas dos aços é impulsionada por diversos fatores como a necessidade de redução de peso, aumento da resistência ao desgaste, maior conformabilidade e tenacidade, melhor usinabilidade, entre outros. Esta demanda abriu um grande campo de pesquisa que procura ajustar e criar materiais para atenderem diversas exigências que lhes são impostas.

Atualmente, já existem estudos que evidenciam a importância da utilização de ligas especiais com alta resistência na redução do desgaste abrasivo (LEITE, 2009). Há também estudos que fazem comparação entre algumas ligas existentes, a relação entre os ensaios abrasivos de laboratório com a performance real de revestimentos em operação (BIALOBRZESKA, 2015). Outros estudos ainda, mostram a diferença na resistência ao desgaste abrasivo de aços martensíticos de alta resistência e com a mesma classe de dureza, porém com microestruturas e composições químicas distintas (OJALA, 2014).

Estudos relatam apenas análises quantitativas em termos de perda de massa e resistência ao desgaste, outros porém, fazem análises através da observação de micro mecanismos de desgaste. Este trabalho realizou de forma conjunta a análise de perda de massa e dos micro mecanismos de desgaste para os materiais com mesmo nível de dureza e microestrutura diferentes.

O avanço científico deste estudo é a análise comparativa da utilização de cinco ligas metálicas de composições e microestruturas diversas utilizadas na mineração. Foram avaliados três aços resistentes à abrasão baixa liga ao boro (AR) com durezas de 450, 500 e 600 HBW, um revestimento duro (Fe-C-Cr) depositado por soldagem e um aço baixo carbono comum, como referência. Estes são comumente aplicados como revestimento e foram avaliados quanto a resistência ao desgaste superficial por abrasão e sobre a influência de cada microestrutura no desempenho destes materiais.

Foi um aspecto inovador, comparar o material AR600 e a liga Fe-C-Cr quanto ao comportamento no desgaste abrasivo uma vez que se aproximam em dureza (60 HRC), porém com microestruturas distintas. Uma vez que a dureza tem papel fundamental na resistência ao desgaste, porém não atua de forma isolada. O material AR com estrutura martensítica e o revestimento Fe-C-Cr com uma estrutura mista de carbonetos de cromo em uma matriz austenítica comportaram de forma diferente tanto na perda de massa, quanto nos micro mecanismos de desgaste observados (apesar da dureza ser próxima), o que forneceu informações para análises mais complexas que passam a envolver o tipo de operação e de abrasivo que é processado na escolha do revestimento ideal.

2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Atualmente com o incremento produtivo, há necessidade de maior proteção dos equipamentos contra o desgaste. A busca contínua por melhora na durabilidade, redução de manutenção, melhor custo benefício foram a motivação principal deste trabalho. Este estudo foi uma análise de como lidar com a perda de massa dos revestimentos observando os mecanismos de desgaste.

A contribuição técnica e científica do trabalho foi proporcionar de forma conjunta uma comparação da perda de massa dos revestimentos e dos micro mecanismos de desgaste. Comparou-se também o efeito de diferentes propriedades (dureza, composição química, microestrutura, e o efeito destas propriedades na resistência ao desgaste por abrasão, principalmente devido ao fato de dois dos materiais ensaiados possuírem a mesma dureza com microestruturas distintas.

A motivação foi selecionar o material com maior resistência à abrasão para condições que se aproximem da condição do ensaio, e ainda relacionar a perda de massa no ensaio abrasivo com os micro mecanismos de desgaste. No ambiente industrial, a maioria das empresas que utilizam estes revestimentos desconhecem as características dos mesmos e os efeitos negativos da seleção destes por tentativa e erro, além do costume de destacar a dureza como critério único de durabilidade.

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar cinco revestimentos metálicos distintos de acordo com a composição química, dureza e microestrutura, comparando a resistência ao desgaste abrasivo entre eles e os micro mecanismos de desgaste ocorridos.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o revestimento por meio de análise micro estrutural, dureza e composição química;
- Ensaiar os revestimentos quanto a seu comportamento no ensaio abrasivo;
- Estudar as características morfológicas e a dureza relativa do abrasivo, além da sua influência no desgaste;
- Estabelecer relação entre perda de massa dos materiais e os micro mecanismos de desgaste.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão distribuídas informações sobre o desgaste, seus mecanismos e a aplicação de revestimentos.

3.1 Desgaste

Desgaste é um fenômeno que ocorre em peças com movimento relativo em relação à outra superfície, como eixos, pistões, válvulas, cilindros, engrenagens, aparelhos de transporte, maquinários agrícolas e de construção, britadores, escavadeiras e misturadores, que resultam na deformação gradual do componente através da perda de massa (CHIAVERINI, 2005).

O desgaste é um fenômeno presente em diversos segmentos da sociedade. Pinturas rupestres e descobertas arqueológicas demonstram a aplicação de conceitos tribológicos desde a história antiga na confecção das ferramentas de trabalho e instrumentos de caça (RADI, 2007).

O desgaste é causador de grandes perdas econômicas e pode representar 3% do PIB dos países industrializados, contando com materiais de reposição, custo com manutenção corretivas, e gerenciamento logístico do estoque. Com isto, o não gerenciamento desta variável pode causar perda de competitividade de uma empresa, ocorrendo um decréscimo da qualidade e até perda de produtos (RABINOWICZ, 1966).

Os componentes de máquinas da indústria mineradora sofrem desgaste severo devido ao contato com o agregado processado (FERNANDES, 2001). Os danos acontecem inicialmente a nível microscópico, onde o movimento e tipo da partícula aliado ao tipo de superfície determinam o tipo de desgaste, se estendendo de forma macroscópica por toda a superfície do material.

Segundo Ramalho e Miranda (2006), o desgaste envolve uma complexa dependência entre fatores que não podem ser analisados de forma individual. Portanto, uma correlação entre os parâmetros obtidos pelos ensaios de dureza, microscopias, análise de microestrutura, entre outros, formam uma técnica importante para avaliar o comportamento tribomecânico de um sistema.

3.2 Formas de desgaste e ensaios

O desgaste é compreendido como perda de massa de uma superfície e ocorre de modos diferentes de acordo com cada sistema tribológico. A identificação das formas de desgaste atuantes em um determinado sistema tribológico é relevante quando trata-se de prevenção. Entendendo a forma como ocorre a perda de material, pode-se criar mecanismos de aumento de resistência à abrasão.

Operações de extração mineral exigem maior durabilidade dos revestimentos para melhor desempenho dos equipamentos. Nestas operações as formas de desgaste mais comuns são desgaste de deslizamento, impacto, e por compressão (SSAB, 2009). A Figura 1 ilustra estas formas de desgaste.

Figura 1 - Formas de desgaste em processamento mineral, a) Desgaste deslizante; b) Desgaste por impacto; c) Desgaste por compressão.



Fonte: SSAB, 2009.

Segundo Bialobrzeska (2015), a maneira de se definir o melhor material para uma aplicação é realizando testes práticos, porém nem sempre é possível devido à complexidade do tribosistema e o custo gerado, além da grande diversidade de materiais existentes no mercado. Com isto, os ensaios de laboratório vêm auxiliando o desenvolvimento das ligas, com menor custo e maior controle de variáveis.

Existem estudos que aplicam estes ensaios para verificar a capacidade de um material em resistir ao desgaste, e analisar as interações entre os abrasivos e os materiais de revestimento. Segundo Hawk et al. (1999), os ensaios mais comuns são:

- Ensaio de roda de borracha, abrasão à três corpos;
- Ensaio de pino sobre disco, abrasão à dois corpos;
- Ensaio de britador de mandíbula, abrasão e compressão;

- Ensaio de tambor impulsor de alta velocidade, abrasão e impacto.

Os materiais podem ser classificados de acordo com sua performance nos ensaios de desgaste. Segundo Bialobrzeska (2015) os ensaios de laboratório podem comparar apenas materiais com mesma microestrutura, proporcionando aplicar os resultados às condições operacionais. Portanto, a técnica de ensaio utilizada pode apresentar resultados diferentes, principalmente, quando se tem uma diferente microestrutura devido à forma de degradação de cada microestrutura e o tipo do desgaste envolvido.

A resistência ao desgaste abrasivo mensurada é afetada de acordo com o ensaio realizado, o que significa também, que é diferente em cada condição. Porém, segundo Bialobrzeska (2015), ressalta-se que cada vez mais estes ensaios vêm sendo utilizados devido à sua facilidade de execução e baixo custo.

Um dos ensaios mais comuns na determinação da resistência ao desgaste abrasivo é o ensaio de roda de Borracha (ASTM G65). No abrasômetro do tipo roda de borracha, é feito um ensaio com carga, no qual o efeito da dureza das partículas abrasivas e a relação de dureza entre o material testado e o abrasivo, podem afetar consideravelmente os resultados.

Os fatores que afetam os resultados deste ensaio devem ser levados em conta para não fazer desta análise uma extensão, sem ressalvas, às condições operacionais (SSAB, 2009).

3.3 Tipos de desgaste

Segundo Silva (2004), os tipos de desgaste se classificam em:

- Abrasão (deslocamento sob tensão de partículas sólidas contra a superfície);
- Erosão (choque de partículas sólidas ou gotas líquidas arrastadas por correntes de fluídos contra a superfície);
- Fadiga superficial (tensões cíclicas durante o contato mútuo de superfícies);

- Adesão (resultante da fricção entre duas superfícies metálicas ásperas que deslizam entre si e que tendem a unir-se por interação química).

Segundo Rendón (2009), o modelo de desgaste por abrasão, pode ser estimado basicamente pelas propriedades de dureza e tenacidade, onde existe uma relação de subordinação da dureza no controle da resistência ao desgaste, já em ensaios envolvendo características de impacto as propriedades da superfície deformada influenciam no desgaste do material de forma mais complexa.

Os ensaios de desgaste permitem a avaliação da resistência ao desgaste por abrasão, e são utilizados por empresas e institutos de pesquisa para classificação de materiais quanto a sua resistência ao desgaste abrasivo. Muitas vezes os resultados obtidos não revelam fielmente a durabilidade do material em operação devido as diferenças de forma, tipo e mecanismos de desgaste.

O desgaste por abrasão, foi tratado com enfoque por ser o fenômeno que ocorreu no sistema tribológico entre os pares metálicos desta pesquisa.

3.4 Desgaste por abrasão e mecanismos de desgaste

O desgaste por abrasão ocorre devido ao contato de uma superfície com partículas abrasivas de alta dureza através de um movimento relativo (ZUM GAHR, 1987). O desgaste por abrasão é muito comum em diversos ambientes industriais, sendo o responsável por danos a equipamentos, e pode ser afetado pela carga aplicada, velocidade relativa e pelo índice de abrasividade das superfícies.

Alguns estudos foram feitos para encontrar a dependência entre o desgaste abrasivo e o teor de minerais duros dos abrasivos presentes no material processado (DEKETH, 1995; KÄSLING; THURO, 2010). Segundo Kasling e Thuro (2010), os estudos comprovaram que o teor de abrasivos duros influencia o processo de escavação e manipulação de rochas em geral, bem como o desgaste de componentes e ferramentas de perfuração.

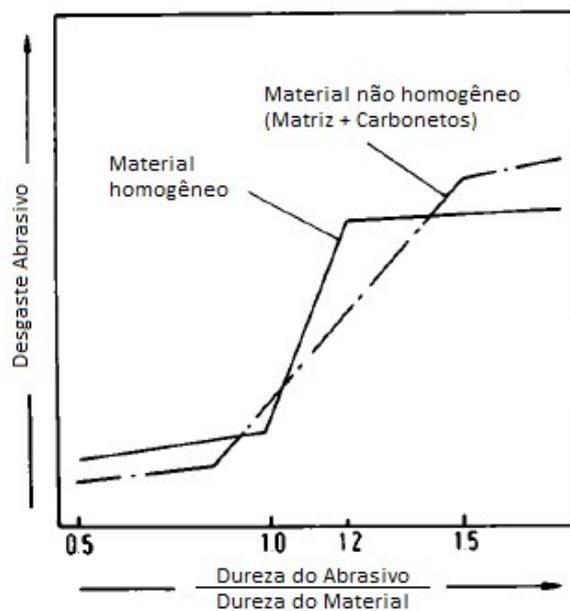
Como observado, a dureza do abrasivo afeta o desgaste, fazendo com que o mesmo ocorra de forma mais intensa quando há uma dureza relativa mais elevada. A dureza relativa é o quociente resultante da divisão da dureza do abrasivo sobre a

dureza do revestimento, caracterizando o desgaste em alto nível (acima de 1,5), ou baixo nível (abaixo de 1) (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Plinninger et al. (2002), o desgaste abrasivo em baixo nível ocorre quando os minerais envolvidos são mais macios que o revestimento, e de alto nível quando os minerais contêm um conteúdo maior que 20% de partículas mais duras que o revestimento.

Na Figura 2, apresenta-se a transição entre desgaste de baixo nível e desgaste de alto nível de acordo com relação entre a dureza das partículas e a dureza do material de revestimento.

Figura 2 - Desgaste abrasivo em função da taxa entre as durezas das partículas abrasivas e a dureza do material



Fonte: Zum Gahr (1987, p. 94).

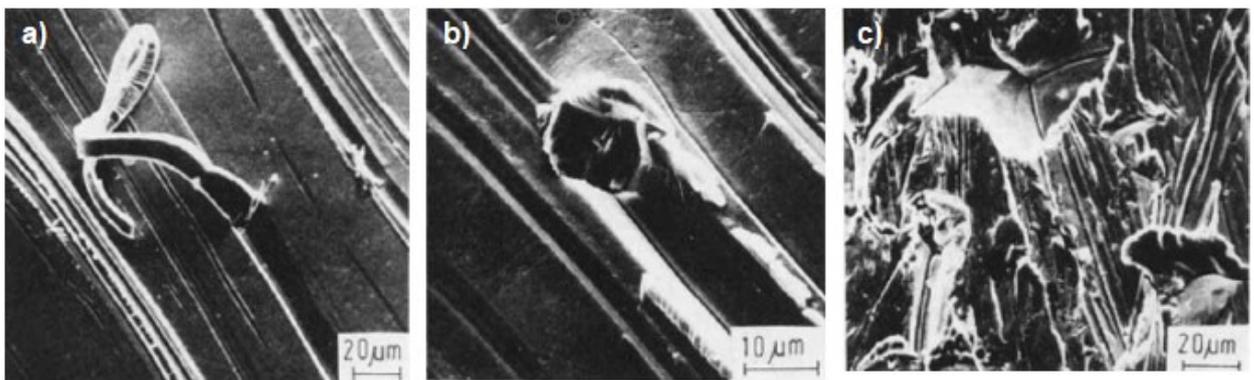
No desgaste abrasivo, ocorrem micro mecanismos que são responsáveis pelo arrancamento de material da superfície. Pode-se distinguir os micro mecanismos de desgaste abrasivo em dois tipos: os que podem ser controlados por deformação plástica, como o micro corte e micro sulcamento e os controlados por fratura frágil quando o material de revestimento possui elevada dureza, como o micro trincamento (HUTCHINGS, 1992).

3.4.1 Micro corte e Micro sulcamento

Os micro mecanismos de desgaste são formas micro estruturais de arrancamento de material, a nível das partículas abrasivas, que provocam degradação do material.

Segundo Zum Gahr (1987), os micro mecanismos de desgaste (Figura 3) que ocorrem à base de deformação plástica são o micro sulcamento e o micro corte, e representam interações que ocorrem predominantemente em materiais dúcteis. O micro corte causa maior perda de massa e desgaste por expulsar o material do sulco. O micro trincamento ocorre devido à alta dureza superficial responsável por uma fragilidade localizada.

Figura 3 – Micro mecanismos de desgaste: a) Micro corte, b) Micro sulcamento e c) Micro trincamento

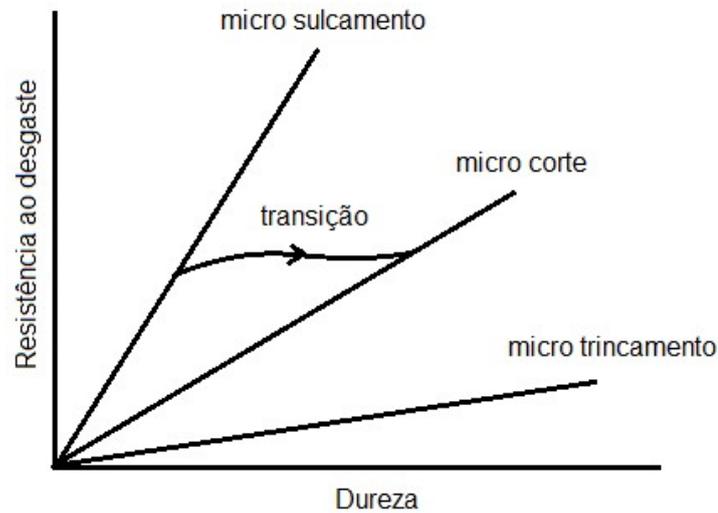


Fonte: Zum Gahr (1987, p. 95).

Segundo Mutton e Watson (1982) a variação da dureza com a resistência ao desgaste do material causa a transição entre micro corte e micro sulcamento, conforme ilustrado na Figura 4, e materiais com elevada dureza apresentam micro trincamento como micro mecanismo de desgaste predominante.

Como ilustrado no gráfico da Figura 4, o micro trincamento se apresenta em materiais com elevada dureza, e é um micro mecanismo que ocorre devido à fratura frágil do material de revestimento.

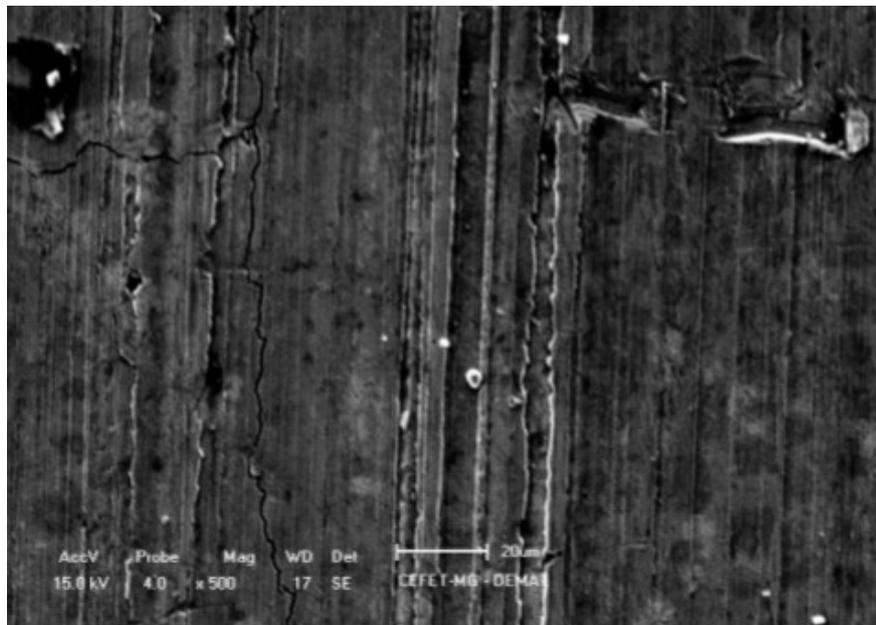
Figura 4 - Gráfico dos micro mecanismos de desgaste abrasivo associados com as variações da resistência à abrasão e dureza.



Fonte: Mutton, et al. (1982).

Adicionalmente as classificações feitas por Zum Gahr, apresenta-se abaixo na Figura 5, uma ranhura proveniente de micro sulcamento com indícios de micro trincamento. Este resultado foi obtido no ensaio roda de borracha com ligas metálicas depositadas por soldagem.

Figura 5 – Imagem de MEV de micro mecanismos de desgaste



Fonte: Silva (2016).

3.4.2 Micro trincamento

De acordo com Tabor (1964), os materiais frágeis não são capazes de absorver a deformação imposta pelo impacto de partículas, e a esta deformação está associada uma tensão que excederá o limite de resistência do material, o que resultará na formação de trincas, causando deslocamento de partes do revestimento e diminuindo a resistência ao desgaste.

O micro trincamento pode gerar níveis de desgaste ainda maiores caso o material de revestimento seja submetido a condições operacionais que favoreçam a fratura do material de revestimento, como por exemplo, operações com impacto, ou abrasão e impacto.

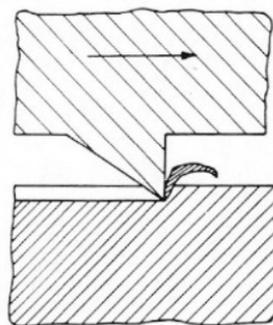
3.4.3 Abrasão à dois corpos

O desgaste abrasivo ocorre à dois corpos, quando existe apenas o corpo e o contra corpo compondo o sistema tribológico, ou seja, não há um elemento interfacial entre os dois, e no caso do processamento mineral, apenas o mineral provocaria o desgaste de uma determinada superfície.

A abrasão a baixa tensão é responsável pelo desgaste de materiais quando geralmente tem-se um sistema tribológico com dois corpos, conforme Figura 6, e a tensão imposta pelo movimento do abrasivo sobre o revestimento não são suficientes para fragmentação das partículas abrasivas (SILVA, 2004).

Este tipo de desgaste ocorre pelo micro sulcamento, ou micro corte, que consiste na formação de cavacos devido à tensão cisalhante à frente da partícula abrasiva (SILVA, 2004).

Figura 6 - Mecanismo de abrasão à dois corpos



Fonte: Zum Gahr (1987, p. 84).

Este sistema conta apenas com a força do próprio particulado para remoção de material, sem a fragmentação do abrasivo, e por isso se caracteriza com o nome de baixa tensão. Segundo Silva (2016), essa definição é essencial para se identificar quais ensaios e verificações devem ser feitas para caracterização do sistema tribológico atuante e avaliar o comportamento dos materiais sujeitos à este tipo de desgaste.

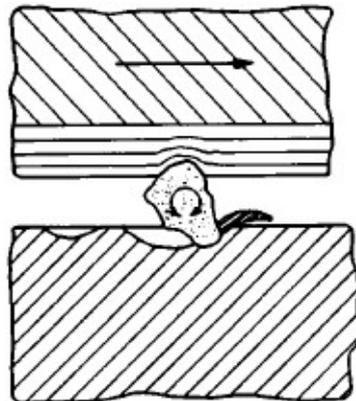
3.4.4 Abrasão à três corpos

O desgaste abrasivo ocorre à três corpos, quando temos o corpo, o contra corpo, e as partículas abrasivas como elemento interfacial compondo o sistema tribológico, ou seja, os abrasivos são pressionados contra duas superfícies simultaneamente.

A abrasão a alta tensão é responsável pelo desgaste de materiais quando geralmente existe um sistema tribológico com três corpos, conforme Figura 7, este processo envolve a retirada de grandes partículas do material. Este tipo de desgaste é causado pelo micro sulcamento ou micro trincamento e é caracterizado pela fragmentação de partículas abrasivas devido ao efeito da tensão aplicada sobre as mesmas (SILVA, 2004).

Neste caso o limite de resistência à ruptura do abrasivo é excedido onde o mesmo tem sua granulometria reduzida. Em alguns casos no revestimento pode ocorrer o micro lascamento proveniente do encontro das micro trincas subsuperficiais anteriormente nucleadas devido à elevada dureza do revestimento.

Figura 7 - Mecanismo de abrasão à três corpos.



Fonte: Zum Gahr (1987, p. 84).

Segundo Silva (2016), este tipo de desgaste ocorre principalmente pelo efeito de deformação plástica e das impressões que são geradas no material devido à compressão característica da abrasão à três corpos.

O desgaste à três corpos é proporcional à carga e à distância de escorregamento entre superfícies e inversamente proporcional à dureza, dessa relação obtêm-se o coeficiente de desgaste (ARCHARD, 1953).

Existem pesquisas sobre o desgaste à dois e três corpos, porém ressalta-se a importância em caracterizar o abrasivo para entender como ocorre o desgaste e os principais fatores que o influenciam (PETRICA, 2013). Segundo Fang (2004) e Stevenson (1996) a caracterização das partículas também é um ponto importante que descreve o desgaste abrasivo, por isso é de extrema importância caracterizar a rocha e o seu particulado abrasivo para melhor compreender o desgaste no processamento mineral.

No processamento mineral, o tamanho e a forma das partículas são de grande importância para descrever o desgaste e a performance de revestimentos. Quanto maior a partícula, com maior energia de impacto ela irá atingir o revestimento, e por consequência, tende a promover maior desgaste. Quanto à forma, tem-se que a agudeza das partículas, concentram as tensões sobre o material de revestimento sendo capazes de promover maior desgaste através do micro sulcamento ou micro corte. (WOLDMAN, et al., 2012; XIE, et al., 1996; PETRICA, et al., 2013; STACHOWIAK, et al., 2001).

Segundo Badisch (2010) e Trezona (1999) a maneira como o abrasivo interage com o revestimento influencia a taxa de desgaste, geralmente presencia-se taxas de desgaste menores à três corpos, pois em dois corpos existe o efeito do impacto sendo o micro corte predominante em revestimentos macios (120 - 160 HV). Para abrasão à dois corpos verifica-se também o micro sulcamento, quando o revestimento impõe uma resistência ao corte devido à uma maior dureza superficial.

Em situações semelhantes de abrasão, no processo à alta tensão o dano causado tende a ser mais severo que nas situações de abrasão à baixa tensão visto que as partículas são pressionadas contra a superfície do revestimento (RIBEIRO, 2004).

3.5 Revestimentos

O processo de desgaste ocorre em diversos equipamentos, porém para determinados processos não é possível evitar a deteriorização por completo, como por exemplo na mineração e siderurgia. Assim, são adotadas algumas práticas que tem o intuito de minimizar os impactos causados pelo desgaste. Uma forma comumente utilizada é a aplicação de revestimentos.

Como observado em um chute de transferência de minério de ferro apresentado na Figura 8, os revestimentos são materiais de proteção aplicados nas superfícies de contato com abrasivos (fluxo de material), afim de evitar o desgaste da estrutura e a perda completa deste equipamento. Segundo Buchely, et al (2005), a aplicação de revestimentos de dureza elevada é uma das maneiras mais eficazes de melhorar a resistência ao desgaste abrasivo.

Figura 8 – Imagem da vista interna de um chute



Fonte: Silva, 2016 (adaptado)

Ressalta-se que a aplicação dos revestimentos adequados e com as melhores propriedades, depende de uma análise dos mecanismos de desgaste envolvidos, as características do abrasivo e do próprio revestimento, afim de que seja feita a melhor opção técnica e financeira para o sistema (ZUM GAHR, 1987).

Entre os revestimentos mais comuns estão os revestimentos duros alta liga de cromo depositados por soldagem e aços laminados e temperados objetos de estudo deste trabalho. As placas de revestimento podem ser fabricadas em qualquer um destes materiais de acordo com a aplicação e disponibilidade financeira para aquisição.

Estes materiais geralmente são usados em aplicações semelhantes na indústria de extração e beneficiamento como materiais selecionados para resistência ao desgaste e são obtidos comercialmente.

3.5.1 Aços

Os aços são ligas metálicas formadas basicamente por ferro e alguns elementos em menores quantidades. Com o avanço da tecnologia os aços começaram a ser empregados na indústria por sua facilidade de processamento, baixo custo e alta resistência mecânica, sendo aplicados como revestimento em diversas aplicações.

Segundo Chiaverini (2005) os aços podem ser classificados quanto à composição química, micro estrutural e sua aplicação.

Os aços utilizados para aplicações de desgaste, geralmente contam com elevada dureza superficial e microestrutura martensítica, sendo classificados como aços baixa liga. Um fato prático importante sobre a dureza da martensita nestes aços baixa liga (somatório dos elementos de liga, corresponde a 5% do total do material), a dureza da martensita pode depender apenas da concentração de carbono nesta liga. Conseqüentemente, se o teor de carbono de qualquer aço de baixa liga for conhecido, a Dureza do aço quando tem uma estrutura martensítica pode ser determinada mais facilmente (REED-HILL, 2008).

3.5.1.1 Aços baixa liga ao boro

O aço AR (*abrasion resistant*) é um aço baixa liga, resistente à abrasão com dureza de 450, 500 ou 600 HBW (SSAB, 2013) manufaturado através de laminação à quente seguido de têmpera e revenimento, que é aplicado em componentes e estruturas sujeitas ao desgaste por abrasão e impacto. Sua dureza Brinell, HBW, está de acordo a norma europeia EN ISO 6506-1, e é mensurada em uma superfície fresada de 0,5 - 2 mm abaixo da superfície da chapa.

As chapas laminadas resistentes à abrasão possuem no mínimo 90% da dureza indicada superficialmente em seu núcleo, mostrando um perfil homogêneo ao longo da espessura do material. A dureza do AR, como de todo aço martensítico, é dependente do seu teor de carbono, em quanto sua composição química, que conta com a presença de elementos de liga como Níquel, molibdênio e principalmente o Boro, aumenta a temperabilidade do aço e promovem com maior facilidade a formação martensítica afastando as curvas de temperabilidade e retardando as transformações difusionais. (OJALA, 2014).

Segundo Ojala (2014), em seu estudo foi possível observar a tendência de melhor resistência abrasiva para aços microligados ao Boro, elemento responsável por aumentar a temperabilidade destes materiais.

As principais marcas e os respectivos fabricantes deste material são: Hardox® (SSAB), Abrazzo® (Tata Steel) e Quard® (NLMK Clabecq). Estes materiais são fabricados por usinas siderúrgicas em várias partes do mundo, onde apresentam alcance global nas aplicações de desgaste abrasivo.

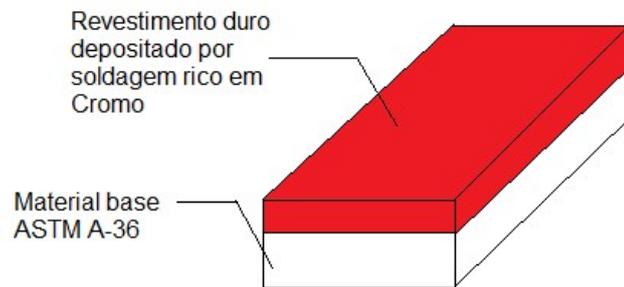
Os materiais AR possuem bons valores de tenacidade devido ao refino de grão e sua microestrutura homogênea, podendo ser utilizados, inclusive, como materiais estruturais de alta resistência mecânica (SSAB, 2013).

Este material vem sendo usados nas indústrias de extração, beneficiamento, processamento e transporte de agregados minerais, devido à sua alta resistência, acessibilidade no mercado e baixo custo comparado com outros materiais similares.

3.5.2 Ligas do tipo carboneto de cromo (*hardfacing*)

As ligas revestidas do tipo carboneto de cromo, são constituídas por um material de baixa dureza (normalmente um aço baixo teor de carbono), com um revestimento duro depositado por soldagem rico em cromo, como mostrado no esquema da Figura 9.

Figura 9 – Esquema de fabricação da chapa revestida Fe-C-Cr por soldagem



Fonte: Próprio autor.

As principais marcas e os respectivos fabricantes deste material são: Wearplate® (Railroad), CDP® (Eutectic) e SHP® (Esco corporation). Estas ligas podem ser fabricadas em diferentes espessuras de material base e revestimento duro sendo as mais comuns: 6+4, 8+5 (objeto de estudo deste trabalho), 8+7, 10+5, 10+7, 12+7 mm.

Segundo Crook e Hutchings (1992), revestimento duro é um método habitualmente empregado para aumentar a resistência ao desgaste superficial de ferramentas agrícolas, componentes para a mineração, equipamentos operacionais de preparo de solo e outros. Uma liga é depositada por soldagem sobre a superfície de um material de baixa dureza, com a finalidade de aumentar a dureza e resistência ao desgaste sem perda significativa de ductilidade ou tenacidade, através do material base.

As ligas para revestimento contendo acima de 16%Cr e 4%C, além de outros elementos químicos, são altamente resistentes à oxidação e ao desgaste e comumente chamadas de ligas de “carbonetos de cromo”. Isto se deve ao fato desta liga apresentar carbonetos duros de cromo dispersos em uma matriz. Sob desgaste abrasivo de baixa tensão, essas ligas estão entre as melhores disponíveis comercialmente (JACKSON, 1970).

Existem várias ligas *hardfacing* comercialmente disponíveis para a proteção contra o desgaste. A forma construtiva das mesmas passa por depósitos feitos por soldagem com uma microestrutura composta por carbonetos dispersos em uma matriz geralmente austenítica a qual é utilizada para aplicações com elevada abrasão (VAZQUEZ, 2000).

Existem divergências quanto à resistência ao desgaste de materiais revestidos e qual a propriedade que mais influencia neste parâmetro. A resistência à abrasão de uma liga com revestimento duro depende de fatores tais como: o tipo dos carbonetos formados, a forma dos mesmos e como estão distribuídos, bem como a tenacidade e o comportamento da matriz na qual os carbonetos estão alocados (CHATTERJEE, 2003).

Para Martins Filho (1995), a maior resistência ao desgaste por abrasão é obtida pelos depósitos de soldagem com menor aporte térmico e isentos de trincas os quais proporcionam microestrutura com alto teor de austenita, propícia ao endurecimento por deformação plástica.

Contudo para Hernández (1997), a microestrutura de maior resistência à abrasão ocorreu em microestruturas com aumento percentual de carbonetos e pela diminuição da largura das dendritas de austenita, as quais ficaram menos expostas à ação das partículas abrasivas.

Segundo Paranhos et al. (1998), o aumento dos teores de C e Cr reduzem a formação de austenita primária e o aumento da formação de microestrutura composta de carboneto primário do tipo M_7C_3 que apresenta maior resistência à abrasão de baixa tensão.

Para Lima et al. (2009), os carbonetos de cromo do tipo M_7C_3 (1800 HV) têm um importante papel na resistência ao desgaste abrasivo devido à sua ação como barreira ao micro corte e ao micro sulcamento quando se submete este revestimento à operações de extração mineral contendo particulado abrasivo.

Segundo Lindroos, (2015), o desgaste abrasivo por impacto se intensifica com o surgimento de trincas de acordo com o aumento da dureza superficial do material, causando uma limitação na aplicação de ligas reforçadas com carbonetos para aplicações de impacto. Esta ligas, geralmente resistem melhor ao desgaste abrasivo, porém possuem um comportamento frágil com geração de micro trincas que podem afetar a performance ao desgaste deste material comparado aos aços martensíticos.

Eletrodos ricos em cromo são amplamente utilizados devido ao baixo custo e boa disponibilidade, no entanto, eletrodos com outros elementos de liga como tungstênio

ou ricos em vanádio oferecem melhor desempenho devido a uma boa combinação de dureza e tenacidade e por formar maior quantidade de carbonetos complexos, resistindo mais ao desgaste principalmente quando existem outros mecanismos envolvidos (CHOO, 2000).

3.6 Sistema Tribológico

A tribologia é a ciência que estuda a interação das superfícies, através de um movimento relativo entre elas. A tribologia atua nos campos da mecânica, física, química, materiais e com os conhecimentos em lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas tribológicos existentes (WINER, 1990).

A caracterização do sistema tribológico é de suma importância para entender o processo de desgaste e compreender qual a forma mais eficiente de combatê-lo. Esta caracterização parte da descrição do comportamento das variáveis envolvidas no sistema. Geralmente o sistema tribológico é composto por corpo, contra-corpo, abrasivos e um movimento relativo entre eles (ZUM GAHR, 1987).

3.7 Fatores que influenciam a resistência ao desgaste por abrasão

Alguns fatores são responsáveis pela ocorrência do desgaste por abrasão, dentre estes fatores: microestrutura, elementos de liga, dureza, tenacidade, tamanho e dureza do abrasivo.

3.7.1 Influência da Microestrutura e dos elementos de liga

Estudos recentes mostram a importância da microestrutura e dos elementos de liga na composição de uma liga resistente ao desgaste, em detrimento do antigo conceito de dependência única da dureza para este fim, pois já é conhecido que a microestrutura exerce influência determinante no mecanismo de desgaste, e os elementos químicos por serem modificadores da microestrutura, também exercem de forma indireta (BIALOBRZESKA, 2015; OJALA, 2014).

Segundo Ojala (2014), em testes realizados foi observado que nem o material mais duro obteve a menor perda de massa e nem o material mais macio sofreu a maior perda de massa, mostrando que os resultados de resistência abrasiva também são orientados segundo a microestrutura e elementos de liga do material. Os materiais

que apresentaram maior perda de massa foram os que permitiram arranhões (micro cortes) mais longos e profundos.

As ligas produzidas para revestimento resistentes à abrasão normalmente são classificadas pelos elementos químicos, microestrutura e dureza presentes na mesma.

O carbono é o constituinte mais importante das ligas à base de ferro para revestimento duro e resistência ao desgaste abrasivo, porque na presença de outros elementos de ligas, tais como cromo, molibdênio, tungstênio, manganês, silício, vanádio, nióbio, nitrogênio e titânio, irá formar a microestrutura final resistente ao desgaste através dos carbonetos (THORPE, 1985) além de promover a formação martensítica e aumento de dureza devido à esta microestrutura.

O cromo é utilizado para imputar resistência ao desgaste abrasivo à várias ligas fundidas, devido a precipitar-se formando carbonetos com o carbono que seria para formação de lamelas de grafita, sendo assim, as ligas fundidas com teor de cromo acima de 10% produzem mais carbonetos primários e secundários podendo gerar ligas comerciais resistentes ao desgaste, corrosão e com boa tenacidade (SILVA, 2016).

O Nióbio também é um elemento formador de carbonetos e sua presença nos aços proporciona a formação de carbonetos do tipo MC. Os carbonetos de nióbio podem se apresentar como carbonetos primários (formados antes do ponto eutético da liga) ou eutéticos (GREGORY, 1980).

Segundo Silva (2016), os carbonetos são designados como primários quando são oriundos de uma reação eutética proveniente de laminação ou lingotamento, e como secundários quando são provenientes de transformações do estado sólido, à temperaturas mais baixas, como em tratamentos térmicos.

A determinação da resistência ao desgaste abrasivo de um material passa por diversos fatores e um dos principais é a microestrutura. Todo arranjo micro estrutural influencia de forma significativa a interação do material com o abrasivo, em especial às ligas que tem a formação de precipitados e carbonetos dispersos em uma matriz cuja formação depende dos seus elementos de ligas e tratamentos térmicos (SILVA, 2016).

Segundo Dieter (1986), o aumento de resistência mecânica por precipitação já é amplamente conhecido, geralmente este efeito está presente nas ligas que solubilizam uma quantidade de elementos químicos à altas temperaturas e quando esfria, a solubilização destes elementos fica prejudicada gerando os carbonetos em forma de precipitados em uma matriz, ou quando a segunda fase não tem grande coerência com a matriz a mesma já se encontra em forma de precipitados finamente dispersos, também conhecido como endurecimento por dispersão.

Em ligas com formação de precipitado, as fases são os principais responsáveis pelo aumento substancial na resistência ao desgaste, enquanto que a matriz assegura a necessária tenacidade e ligação entre as fases (SHAKELFORD, 1996).

Para tal sabe-se que a influência desta segunda fase depende da dureza das fases, distribuição do precipitado, fração volumétrica, tipo de matriz, morfologia e estabilidade (THORPE, 1985).

O aumento da resistência ao desgaste com o aumento da fração volumétrica de carbonetos nas ligas hipoeutéticas é devido à proteção oferecida à matriz pelos carbonetos eutéticos. Nas ligas hipoeutéticas observa-se que a matriz de austenita é preferencialmente removida em relação aos carbonetos eutéticos duros por sua baixa dureza que varia de 170-350 HV, apresentando notável capacidade de endurecer por trabalho mecânico quando deformada (THORPE, 1985). As ligas hipereutéticas atuam da mesma maneira que as ligas hipoeutéticas, mas os carbonetos primários trincam e grande parte deles são arrancadas, aumentando a taxa de desgaste. Logo, observa-se que carbonetos grandes não proporcionam aumento da resistência ao desgaste das ligas devido à sua fragilidade e alta dureza, embora resistam mais à abrasão que a matriz, sendo o modo como estão fixados na matriz responsável pela ocorrência ou não de trincas durante a abrasão (GREGORY, 1980).

Em estudos recentes tem-se comprovado a importância dos elementos de liga na geração de microestruturas mais duras e tenazes à fim de resistir ao desgaste. Segundo Deng (2014), em seu estudo sobre resistência ao desgaste de aços médio carbono e baixa liga martensíticos, o aumento de resistência ao desgaste dos materiais comparados por ele se deve ao aumento de dureza e tenacidade obtido

através de modificações no processo de obtenção do aço ensaiado e de seus elementos de liga.

Segundo Ojala (2014), em se tratando de materiais temperados para resistência à abrasão, as variações de composição química, afetam consideravelmente à microestrutura, a qual afeta diretamente a performance do material contra o desgaste abrasivo. A dureza é normalmente tida como padrão de durabilidade e de seleção de materiais, porém um estudo adicional foi feito de forma a evidenciar que materiais de mesma classe de dureza, não comportam da mesma forma devido à diferenças de composição química, onde foram ensaiados alguns materiais temperados de mesma classe de dureza, mostrando variações de perda de massa de até 53%, mostrando que a análise destes parâmetros passam por questões micro estruturais ligadas à composição química.

Neste estudo, foi evidenciado que a adição combinada de Níquel e Molibdênio são fatores significativos no aumento de temperabilidade dos aços para formação de maior quantidade de martensita. O Boro é o elemento que mais afetou a temperabilidade dos materiais quando adicionado isoladamente, causando maior atraso nas transformações difusivas e maior formação martensítica (OJALA, 2014).

3.7.2 Influência da dureza

A dureza, compreendida como resistência mecânica localizada, apesar de não ser o único fator que influencia no desgaste, tem uma importância fundamental neste processo. A influência da dureza ocorre nos materiais de revestimento e é observada através da resistência à penetração de abrasivos durante o desgaste.

Para ambos os materiais (ligas endurecidas por precipitados e aços martensíticos) a dureza atua de forma implícita na resistência ao desgaste abrasivo, não diretamente como uma propriedade única do material, mas como uma variável que compõe o processo de análise tribológica ligada principalmente à microestrutura do revestimento (ZDRAVECKÁ, 2014).

A dureza é importante quando se analisa ligas formadas por precipitados e uma matriz, onde a dureza da matriz exerce influência na proteção dos carbonetos como barreira física à penetração de abrasivos, e a dureza dos carbonetos possui elevada resistência ao desgaste através de micro cortes (GREGORY, 1980).

Quando se trata de materiais martensíticos e sua resistência à abrasão, a influência da dureza está ligada à fortes barreiras de movimentação de discordâncias e de penetração de abrasivos na estrutura do material que podem advir da estrutura martensítica em maclas ou da alta densidade de discordâncias presentes nesta fase do material (MADDIN; COTTRELL, 1955).

A dureza obtida por uma estrutura martensítica, comumente presente em ligas Fe-C, está associada à um processo de deformação/cisalhamento dos grãos que independe da difusão durante o tratamento térmico de algumas ligas (DIETER, 1986).

3.7.3 Influência da tenacidade

Segundo Rendón (2009), as características de dureza e tenacidade são propriedades importantes na obtenção de elevadas resistências ao desgaste. A tenacidade é uma das propriedades importantes quando se trata de aços de alta resistência ao desgaste abrasivo, visto que a resistência ao desgaste abrasivo também está ligada à capacidade do material resistir às deformações sem sofrer danos como trincas ou quebras.

A tenacidade pode ser entendida como a capacidade que o material tem de absorver energia até o momento da fratura, é caracterizada pela área abaixo da curva do gráfico tensão x deformação convencional sendo associada à capacidade que um material tem de resistir à trincas, visto que um material com maior tenacidade absorve mais energia antes de fraturar (trincar). Em aplicações de desgaste abrasivo por impacto, é comum ocorrerem quebras visto que os materiais não absorvem toda esta energia que lhes é fornecida durante a operação.

Devido à elevados valores de tenacidade, os materiais podem resistir a choques, impactos, batidas, indentações ou golpes. Além disso, com elevados índices de tenacidade, pode-se processar o material mais facilmente, mantendo sua resistência à formação e propagação de trincas durante o processo. Em ambientes agressivos, onde os problemas com quebras são imprevisíveis, caros ou até mesmo afetam a segurança de equipamentos e funcionários é interessante à aplicação de um material cada vez mais tenaz (SSAB, 2011).

Devido à elevada tenacidade que alguns materiais de alta resistência ao desgaste já apresentam, suas aplicações como material estrutural passam a ser cada vez mais comuns.

Para uma elevada resistência à abrasão na movimentação e processamento de agregados minerais, é necessária uma dureza elevada acima de 400 HB, mas também suficiente tenacidade mesmo depois de um endurecimento por encruamento devido ao trabalho (evitando micro trincamentos). Caso a superfície, fique frágil, a taxa de desgaste cresce consideravelmente, então mesmo na seleção de aços com mesma classe de dureza é necessário levar em conta outros aspectos, como a tenacidade, para seleção do material com maior vida útil (OJALA, 2014).

3.7.4 Influência do movimento relativo entre partícula e revestimento

O desgaste abrasivo é diretamente proporcional à distância percorrida pelo abrasivo, devido à isso que em ensaios de desgaste, como o ensaio de desgaste pela norma ASTM G-65 (2016) é padronizado o número de revoluções ou a distância percorrida sobre o revestimento. Quando se reduz a quantidade de arraste em relação ao rolamento dos abrasivos sobre a superfície do revestimento o desgaste ocorre de forma menos acentuada, pois haverá uma redução na distância percorrida pelo abrasivo. (MOURITZ, et al., 1989).

O arrancamento de partículas devido ao desgaste abrasivo é consequência de um arrastamento das partículas abrasivas sobre a superfície do material, este desgaste é aumentado pelo movimento relativo entre as partículas seja este pelo mecanismo de abrasão à dois ou à três corpos.

O aumento da tensão de contato irá aumentar proporcionalmente o desgaste causado em determinada superfície devido às micro deformações impostas e aumento da profundidade dos micro cortes causados.

Na Figura 10 ilustra-se a diferença de desgaste que ocorre em um segmento de lâmina, presente em uma carregadeira, peça responsável pelo contato do equipamento com o chão e facilitadora na penetração da pilha de agregados. O desgaste acentua-se nas extremidades da peça, devido à articulação da máquina e as condições de operação. As extremidades da caçamba percorrem uma distância

maior que o centro, revelando maior quantidade de desgaste abrasivo naquela parte por causa da distância tangencial percorrida.

Figura 10 - Desgaste acentuado em segmento externo de caçamba carregadeira devido ao maior movimento relativo



Fonte: Próprio autor.

3.7.5 Influência do tamanho, forma e dureza do abrasivo

Diversas pesquisas analisam às propriedades e características do revestimento, sem se preocupar com o abrasivo causador do desgaste (PETRICA, et al., 2013).

Segundo trabalho desenvolvido por Petrica (2013), os abrasivos descrevem com grande importância os mecanismos de desgaste em um revestimento. O tamanho da partícula, vinculado à sua resistência mecânica, influenciará diretamente na energia de contato que o mesmo irá desenvolver no revestimento. Quanto maior à partícula e mais dura, maior desgaste causará em uma superfície considerando desgaste abrasivo à dois corpos (PETRICA, et al., 2013).

A forma do abrasivo está ligada à sua agudeza e concentração de tensão no contato com o revestimento. Quanto maior à agudeza, mais pontos como quinas em contato com o revestimento. Estas quinas sendo pressionadas por elevadas cargas são capazes de superar à tensão de escoamento do material promovendo à deformação plástica e arrancamento de material do revestimento. Segundo Kulu et al. (2009), no desgaste erosivo, o efeito da angularidade de partículas sobre o

desgaste também pode ser influenciado pela resistência mecânica (por exemplo, resistência à fratura) do revestimento.

Segundo Petrica (2013), a dureza das partículas abrasivas tem uma importância fundamental nos mecanismos de desgaste por abrasão à três corpos, pois tem capacidade de promover micro cortes ou micro sulcamentos na superfície do revestimento. Quanto maior à dureza das partículas abrasivas, maior surgimento de micro cortes, maior desgaste.

4 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para a caracterização dos revestimentos, do abrasivo e os respectivos ensaios realizados.

Como objeto de estudo deste trabalho foram analisados diferentes materiais metálicos aplicados como revestimentos com diferentes classes de dureza, sendo aços baixa liga ao boro com microestrutura martensítica (designados neste trabalho como AR450, AR500 e AR600), uma liga de aço revestido por depósitos de soldagem FCAW à base de cromo (designado como CCO ou bi-metálico) endurecida por precipitação, e um aço com baixo teor de carbono (ASTM A-36), utilizado em aplicações de revestimento *standard* e como referência no ensaio de desgaste.

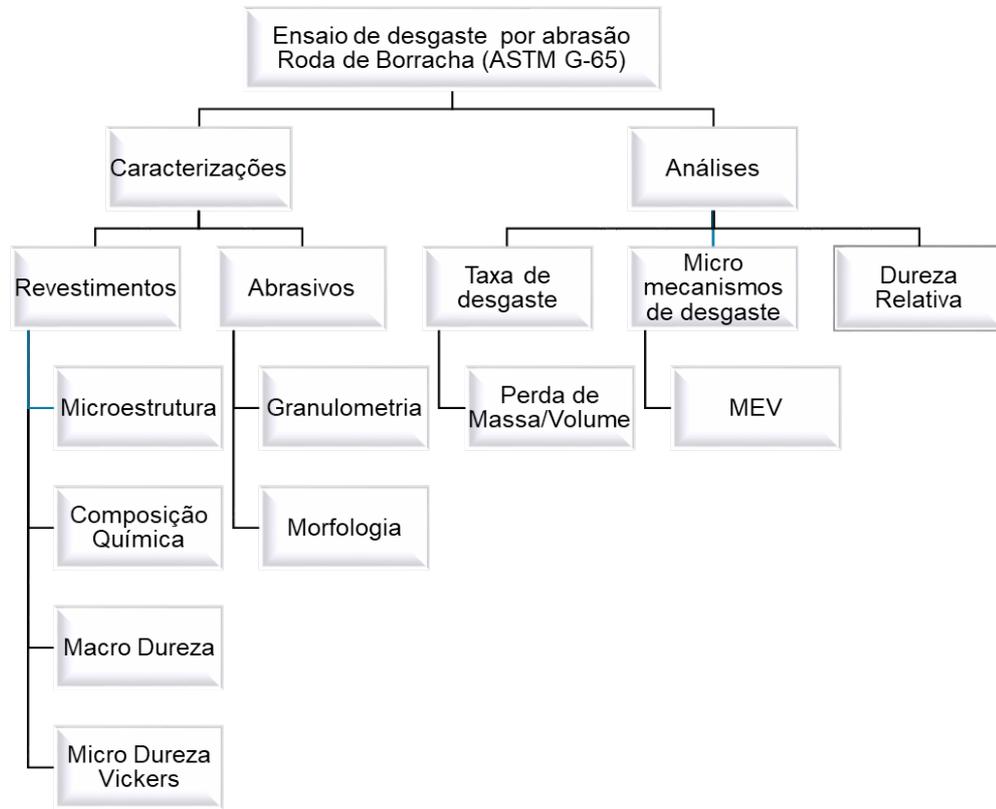
Para caracterização dos revestimentos foram feitos os ensaios de composição química, macro dureza, micro dureza Vickers e análise micro estrutural por microscopia eletrônica de varredura.

Para caracterização do abrasivo foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura.

Para caracterização da resistência ao desgaste por abrasão foram executados ensaios de desgaste (roda de borracha) e análise dos micro mecanismos por microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 11 é apresentado o fluxograma de ensaios executados na metodologia deste projeto.

Figura 11 - Fluxograma de ensaios



Fonte: Próprio autor.

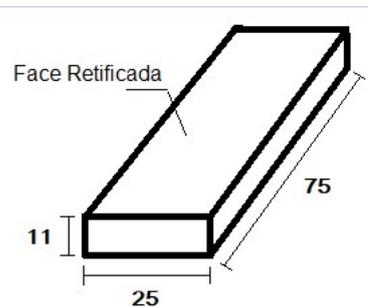
4.1 Corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados por eletroerosão, a partir de chapas comercialmente obtidas destes materiais, nas dimensões de 12 x 25 x 75 mm, exceto os corpos de prova de aço ASTM A-36 que foram serrados em serra de fita.

O processo usinagem por eletroerosão consiste em descargas elétricas com alta energia em curto espaço de tempo causando menor aporte térmico no material, responsável por promover fusão localizada sem alterações na microestrutura do material.

Os corpos de prova foram retificados em uma face, para garantir o acabamento superficial necessário para os ensaios de desgaste, conforme norma ASTM G65-16. As dimensões dos corpos de prova foram padronizadas em 11 x 25 x 75 mm, de acordo com o desenho da Figura 12.

Figura 12 – Desenho do corpo de prova utilizado para ensaio de desgaste, em milímetros.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Revestimentos

Neste tópico será abordado a caracterização dos revestimentos quanto à microestrutura, composição química, macro e micro dureza.

4.2.1 Composição Química

Foram cortadas uma amostra de cada material (AR450, AR500, AR600, CCO e ASTM A-36) nas dimensões de 11 x 25 x 75 mm para análise de composição química que foi feita por espectrometria de emissão óptica no equipamento Fondry Master Xpert.

4.2.2 Macro Dureza e Micro dureza Vickers

As amostras foram ensaiadas no durômetro Rockwell normal Equilam modelo EQTRS, com impressões realizadas na superfície retificada com tempo de endentação de 10 segundos. Foram realizadas 10 medições, com parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para ensaio de macro dureza

	Pré-Carga(Kgf)	Carga (Kgf)	Penetrador	Escala
ASTM A-36	10	100	Esfera temperada 1/16"	HRB
AR450	10	150	Piramidal Diamante	HRC
AR500	10	150	Piramidal Diamante	HRC
AR600	10	150	Piramidal Diamante	HRC
Bi-METÁLICO	10	150	Piramidal Diamante	HRC

Fonte: Próprio autor.

A microdureza foi realizada no micro durômetro Vickers Shimadzu HV-1 dotado de sistema de magnificação de 400x. O ensaio consistiu na aplicação de carga de 25 gf (ASTM A-36 e aços temperados) e 100gf (Bi-metálico), com tempo de aplicação de carga de 20 segundos conforme procedimentos descritos na norma ASTM E384-11. Foram feitos deslocamentos ao longo da espessura das amostras de 1 mm, permitindo avaliar os efeitos de variação de dureza e construção de um perfil ao longo da espessura.

Para os ensaios no micro durômetro as amostras seguiram a mesma preparação da realizada para microscopia óptica sendo: lixamento e polimento seguido de ataque com Nital 2%.

4.2.3 Microestrutura

As amostras para análise de microestrutura foram cortadas, lixadas em lixa abrasiva de SiC (#180, #320, #400, #600, #1200), polidas em suspensão de Al_2O_3 de 3 μ m e posteriormente atacadas com Nital 2%, por um tempo de aproximadamente 15 segundos. As amostras foram analisadas segundo sua microestrutura em microscópio eletrônico de varredura.

4.3 Abrasivo

Foi utilizada para os ensaios de desgaste a areia quartzosa normal Brasileira fornecida pelo IPT (Instituto de pesquisas tecnológicas), segundo a norma NBR 7214, e com granulometria 50.

A areia normal brasileira apresenta granulometria diferente da solicitada na norma ASTM G-65, porém padronizou-se o uso da mesma segundo a norma NBR 7214 para os ensaios de desgaste também sugerido por Viegas (2016).

4.3.1 Classificação granulométrica do abrasivo

A areia número 50 é caracterizada por 95% de material passante na peneira com abertura de 0,6 mm e retido na peneira de 0,3 mm, conforme informado pelo fabricante. Os abrasivos foram utilizados secos e conforme recebido pelo fabricante, atendendo aos requisitos da norma ASTM G-65.

O abrasivo utilizado foi classificado quanto à granulometria segundo a norma NM 248 antes e após os ensaios de desgaste para avaliar a variação granulométrica.

4.4 Ensaios de desgaste

O ensaio de desgaste foi realizado segundo a norma ASTM G65(2016), no qual através de um motor aplica-se a rotação de 200 rpm a um disco metálico revestido por borracha e o mesmo entra em contato com o corpo de prova que permanece estático, enquanto os materiais abrasivos fluem por entre ambos, gerando um desgaste abrasivo no corpo ensaiado com fragmentação do abrasivo.

Os ensaios foram realizados segundo o procedimento “A” da norma ASTM G65(2016). Este procedimento é recomendado para materiais de média a alta resistência à abrasão, compatíveis com os revestimentos selecionados. A norma estabelece alguns parâmetros para realização dos ensaios, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros para ensaio de desgaste

	Procedimento A – ASTM G-65
Revoluções	6000
Distância percorrida	4309 m
Carga	130 N
Tempo	30 min
Fluxo abrasivo	300 à 400 g/min

Fonte: Próprio autor.

Para realização do ensaio de abrasão, foi utilizado o abrasômetro tipo roda de borracha da marca Brastorno ilustrado na Figura 13.

Para controle do número de revoluções utilizou-se um sensor magnético acoplado no dispositivo roda de borracha. Para controle da vazão de abrasivos foi feito um ajuste no bocal do equipamento para a vazão de 350 g/min.

Figura 13 - Máquina roda de borracha



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 14 ilustra a vista interna do equipamento utilizado no ensaio de desgaste.

Figura 14 - Vista interna da máquina para ensaio roda de borracha



Fonte: Próprio autor.

Foi utilizada uma balança analítica com precisão de 0,1 mg para coletar os valores das massas antes e após os ensaios de desgaste. As massas foram medidas após realização de limpeza por ultrassom nos corpos de prova e posterior secagem com álcool antes e após cada ensaio de desgaste.

A Figura 15 ilustra a medida de dureza da borracha de 60 Shore “A” atendendo os parâmetros da norma ASTM G-65.

Figura 15 - Durômetro portátil Shore - Marca Kori Seiki MFG, Tipo: A e borracha natural anti-abrasiva, Dureza: 60 Shore A



Fonte: Próprio autor.

4.4.1 Análise dos micro mecanismos e da morfologia das amostras

A identificação dos micro mecanismos de desgaste, da morfologia superficial das trilhas obtidas e das microestruturas dos materiais ensaiados foram realizados em microscópio eletrônico de varredura Jeol JSM-IT300, e detector de energia dispersiva Oxford X-Max 20.

As imagens foram obtidas com várias ampliações (100x, 250x, 500x, 1000x e 2500x) e de acordo com os parâmetros especificados na Tabela 3. As análises por energia dispersiva foram feitas com auxílio do software AZtec para identificação dos elementos associados as fases observadas.

Tabela 3 – Parâmetros para ensaio de microscopia eletrônica de varredura

	MEV
Distância de trabalho	10 à 20 mm
Ampliações	Diversas
Tensão	30 KV
Modo de obtenção	Elétrons secundários

Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados.

5.1 Revestimentos

Nesta parte do trabalho serão apresentados os resultados obtidos nas análises das propriedades dos revestimentos.

5.1.1 Composição Química

Após realização da espectrometria de emissão óptica os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4. Os percentuais de carbono de todos os materiais encontraram-se dentro do especificado pelos fabricantes bem como as impurezas como fósforo e enxofre.

Tabela 4 – Composição química por espectrometria óptica

Material	AR450	AR500	AR600	Bi-metálico (CCO)
Elemento	Encontrado	Encontrado	Encontrado	Encontrado
Carbono	0,181	0,239	0,399	> 2,5
Silício	0,235	0,234	0,116	0,592
Manganês	1,41	0,667	0,469	0,557
Fósforo	0,0243	0,0198	0,019	0,0357
Enxofre	0,0013	0,0019	0,0037	0,0145
Cromo	0,137	0,561	0,284	19,8
Molibdênio	0,0248	0,0221	0,163	0,0017
Níquel	0,0747	0,0381	2,12	0,101
Boro	0,0006	0,0004	0,0004	0,025
Ferro	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

Fonte: Próprio autor.

Nota-se também que no material bi-metálico, o nível de impurezas (fósforo e enxofre) é mais elevado que nos demais materiais, o que aliado ao processo de fabricação por soldagem e à elevada dureza, é um fator considerável na nucleação de trincas (DIETER, 1986).

No aço AR450 observa-se uma maior quantidade de Manganês, responsável de forma geral, pela maior formação de austenita (DIETER, 1986).

No material AR500 verifica-se um teor maior de cromo em comparação aos outros materiais o que confere ao material maior temperabilidade, gerando a alta dureza e microestrutura refinada, sem maiores adições de outros materiais, mantendo o carbono equivalente ainda baixo para facilitar o processamento através de corte e solda. (SSAB, 2009).

No material AR600 encontra-se maiores teores de níquel e molibdênio, que são elementos responsáveis por aumentar a temperabilidade e causar um refino microestrutural (KRAUSS, 1990), logo, responsável por promover uma liga metálica de alta dureza com grande quantidade de martensita fina.

5.1.2 Macro e Micro Dureza

Após as medições de macro dureza nas amostras, os resultados são apresentados na Tabela 5, já convertidos em Brinell (HBW).

Tabela 5 - Resultados da macro dureza (HBW), Durômetro Rockwell

Macro Dureza (HBW)				
Material	HBW	Desvio Padrão	Variância	HR
AR450	409,8	11,94	142,62	2,65
AR500	478,4	11,14	124,04	2,27
AR600	568	16,19	262,22	1,83
Bi-metálico	634	28,36	804,44	1,66
A-36	123	5,10	26,00	11

Fonte: Próprio autor.

Pode se observar que o material ASTM A-36 apresentou menor variação, devido a estrutura predominantemente ferrítica e homogênea. Os materiais temperados apresentaram variações semelhantes, caracterizadas por boa homogeneização da austenita e martensita para as diferentes classes de dureza. O material bi-metálico apresentou maior variação em função da distribuição dos carbonetos ao longo da matriz austenítica e sua própria natureza bifásica. Todos os materiais obtiveram níveis de dureza dentro do limite indicado pelos fabricantes.

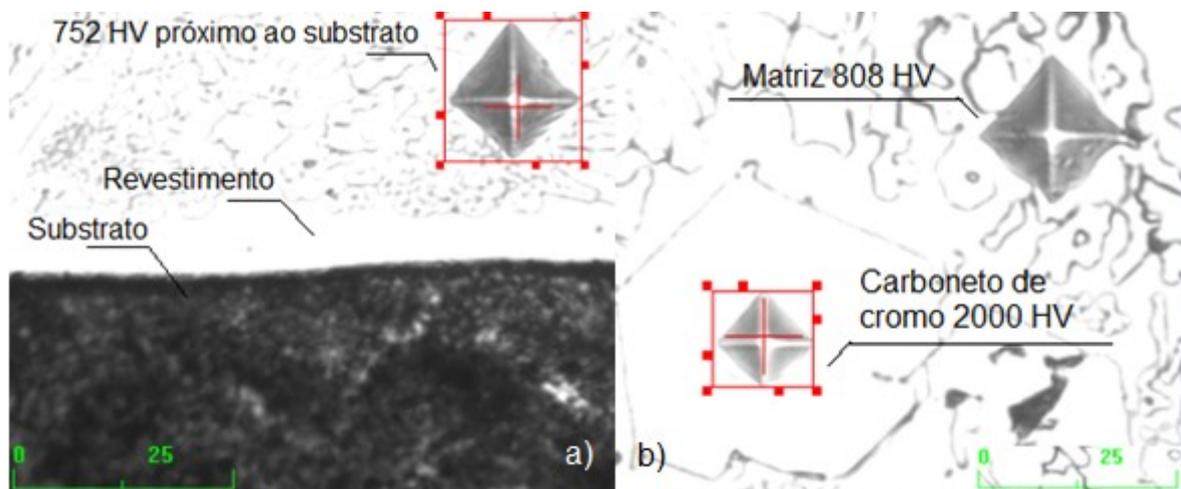
Com os ensaios de micro dureza foi possível atestar os perfis de dureza ao longo da espessura dos materiais com deslocamento padrão de 1 mm afim de evidenciar os possíveis efeitos da diluição do depósito soldado na matriz de baixo carbono. Na

Figura 16(a) é possível observar que próximo à interface (40 μm aproximadamente) revestimento/substrato não há variação considerável de dureza do depósito soldado.

Também foi mensurada a dureza individual dos carbonetos de cromo na liga bi-metálica, conforme Figura 16(b), que se situou entre 1900 – 2000 HV e a dureza média da matriz de 750 – 810 HV.

A micro dureza foi necessária para identificar as fases presentes e a respectiva dureza de cada uma, uma vez que estas contribuem para entender o início e o fim da transição entre desgaste de baixo para alto nível.

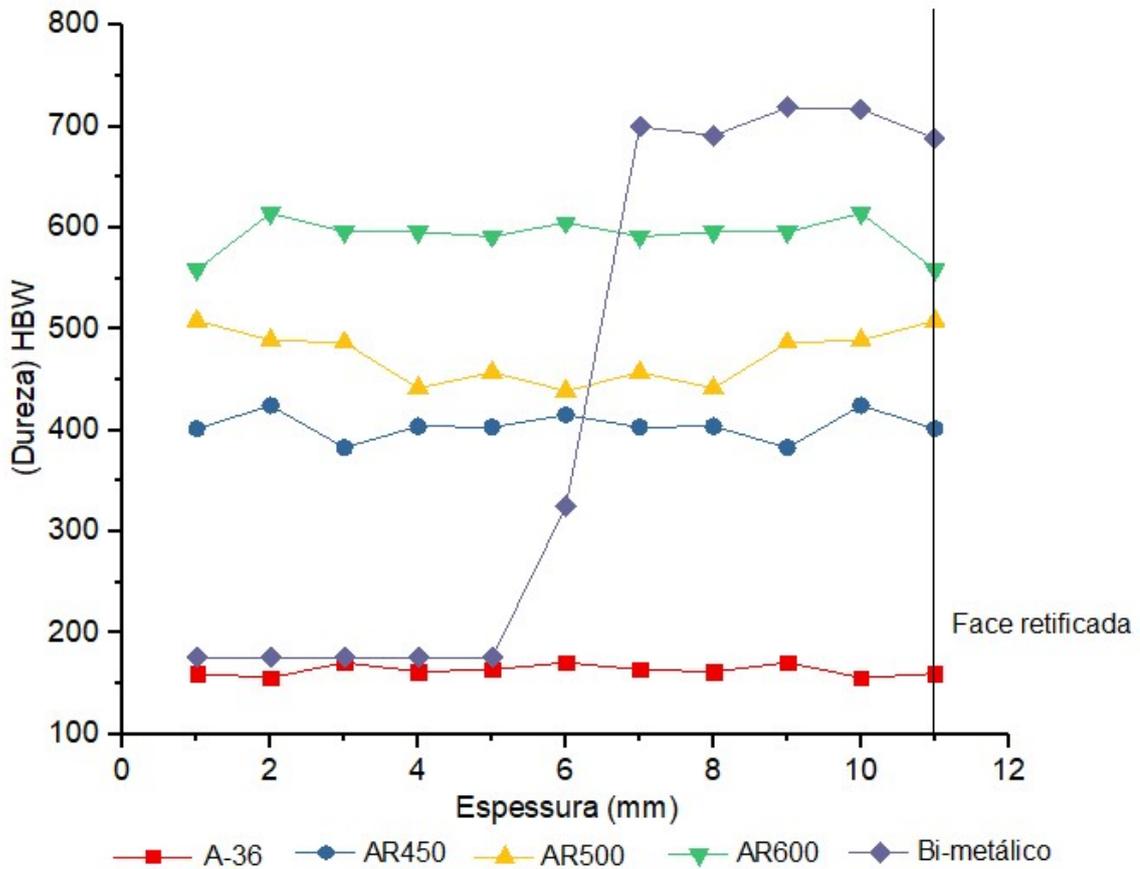
Figura 16 – a) Imagem de Microscopia óptica da dureza da matriz próximo a interface com substrato b) Imagem de Microscopia óptica da dureza individual matriz/carboneto – Chapa Bi-metálica



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 17, observa-se que nos aços temperados (AR) não houve variação considerável de dureza ao longo da espessura devido ao gradiente de temperatura imposto durante o resfriamento brusco no tratamento térmico.

Figura 17 - Resultados da Micro dureza (HBW), Micro durômetro HV



Fonte: Próprio autor.

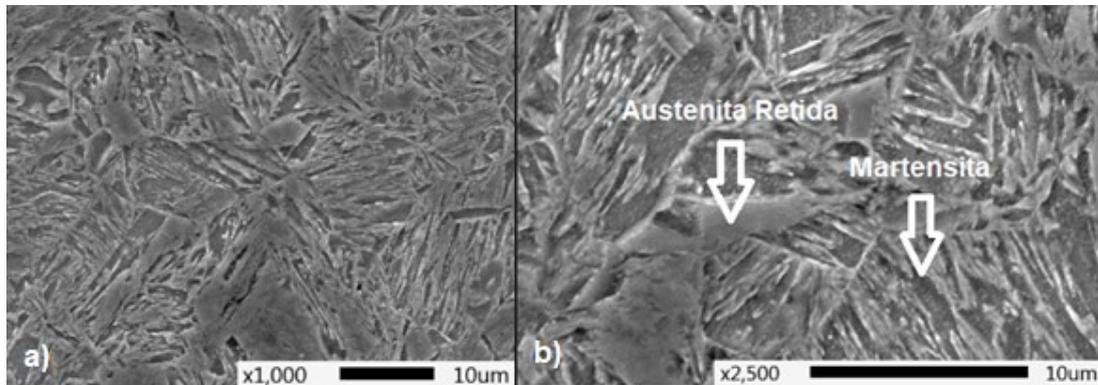
Durante as medições, constatou-se homogeneidade micro estrutural e de dureza nas amostras temperadas dos aços baixa liga ao boro (AR450, AR500 e AR600). Não haviam ilhas isoladas de austenita retida entre os pacotes de martensita que permitisse uma análise separada deste tipo de microestrutura, de acordo com as imagens de MEV das Figuras 18 a 23.

5.1.3 Microestrutura

Após realização das análises micro estruturais das amostras em microscópio eletrônico de varredura e análises complementares por energia dispersiva (EDS), foram obtidas as imagens ilustradas nas Figuras 18 à 23.

Na Figura 18 é apresentada a microestrutura da amostra de AR450 com diferentes ampliações.

Figura 18 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR450 – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura ampliada da amostra AR450 – 2500x



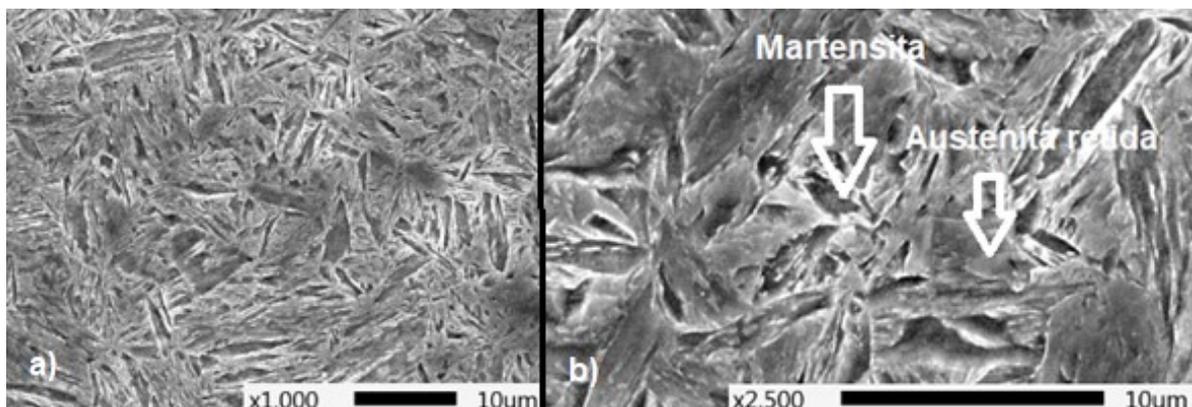
Fonte: Próprio autor.

Para a amostra do aço AR450, foi observado uma microestrutura martensítica com áreas de austenita retida provenientes da adição de manganês. Esta microestrutura é caracterizada por elevada dureza (450 HBW), tenacidade (27J à -40°C) e resistência mecânica ao escoamento (1200 MPa) (SSAB, 2013).

Um material com dureza mais baixa em relação aos outros materiais AR, porém com capacidade de absorção de energia maior pelo *work hardening* (encruamento) devido a austenita retida. Este material pode ser utilizado em operações de desgaste abrasivo e também em locais que exijam características estruturais (SSAB, 2009).

Na Figura 19 é apresentada a microestrutura da amostra de AR500 com diferentes ampliações.

Figura 19 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR500 – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura ampliada da amostra AR500 – 2500x



Fonte: Próprio autor.

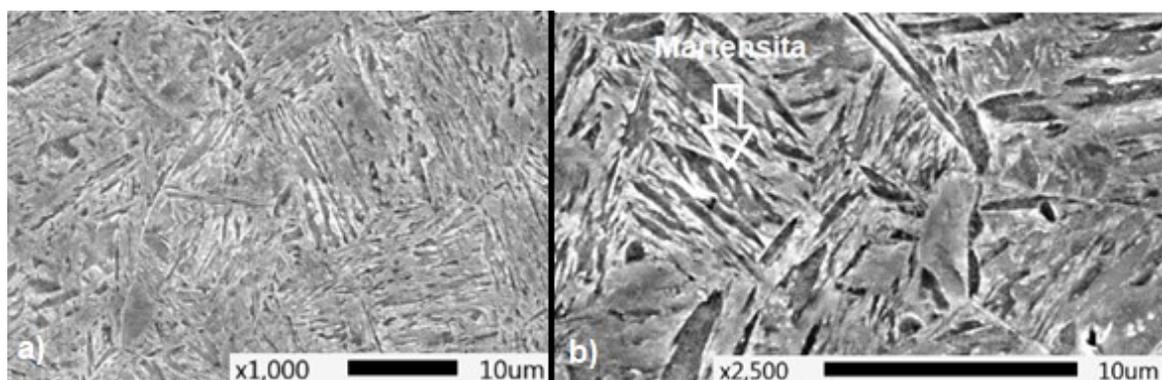
Para as amostras de aço AR500 verificou-se a martensita com teor mais elevado de carbono oriunda de um material com (0,24%C) em comparação ao AR450 (0,18%C). Foi observado no MEV menor tamanho de grão, gerando agulhas primárias de martensita de menor comprimento, responsáveis por maior dureza (500 HBW) comparado ao aço AR450.

A diminuição na austenita retida ocorre devido à maior temperabilidade do material causado pela adição de carbono e outros elementos de liga (ex.: cromo), fazendo com que maiores transformações não difusionais ocorressem, resultando em uma martensita mais fina, em maior quantidade em comparação ao AR450.

Este material pode ser utilizado em operações que exijam elevada resistência ao desgaste e ainda facilidade de processamento (corte e solda), uma vez que a adição de elementos de liga não é elevada a ponto de alterar significativamente o carbono equivalente (SSAB, 2009).

Na Figura 20 é apresentada a microestrutura da amostra de AR600 com diferentes ampliações.

Figura 20 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR600 – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra AR600 – 2500x



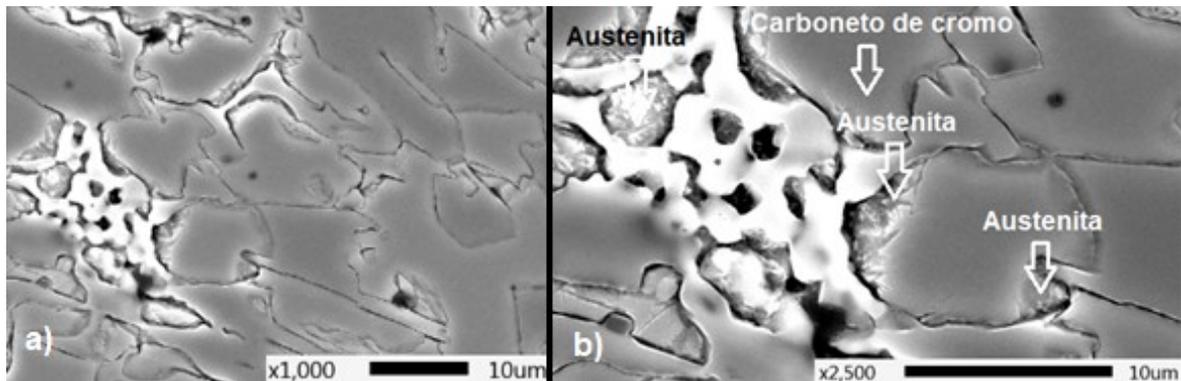
Fonte: Próprio autor.

Para o aço AR600 percebeu-se maior formação martensítica na estrutura durante o resfriamento, praticamente não se encontrando áreas com outros constituintes, resultado de um aço micro ligado e com teor de carbono mais alto (0,4%C) que os demais aços AR analisados. A martensita mais fina é oriunda de um material com alto teor de carbono, além de adição de níquel e molibdênio, o que aumenta a temperabilidade e evita a formação de austenita retida.

Este material é caracterizado por sua elevada dureza (600HBW) e resistência ao desgaste abrasivo em comparação aos demais materiais da grade AR (SSAB, 2013).

Na Figura 21 é apresentada a microestrutura da amostra bi-metálica com diferentes ampliações.

Figura 21 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra bi-metálica – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra bi-metálica – 2500x

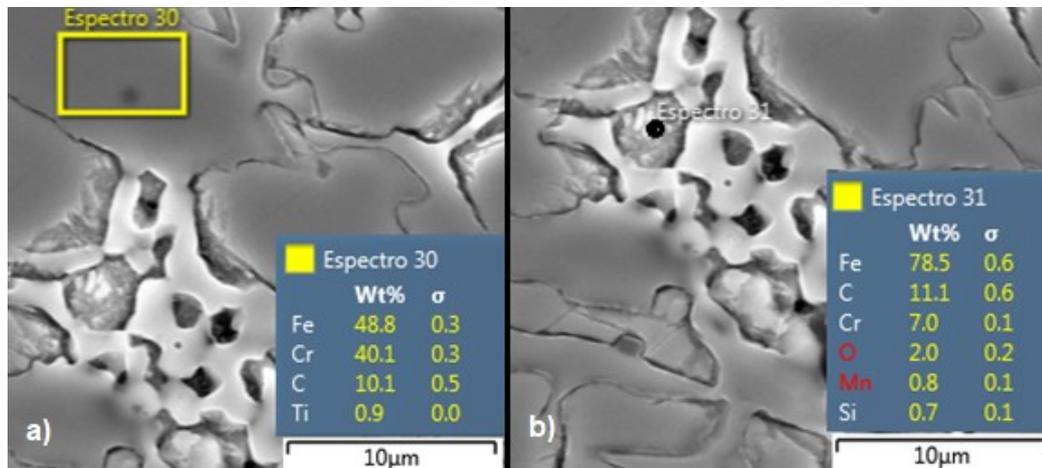


Fonte: Próprio autor.

Para o material bi-metálico, observou-se uma microestrutura com carbonetos de cromo dispersos em uma matriz austenítica. Este material possui elevada resistência ao desgaste abrasivo devido à dureza dos constituintes, porém certa fragilidade micro estrutural em condições de impacto devido à elevada dureza dos carbonetos (2000 HV), formando pontos de destacamento do revestimento duro (SILVA, 2016).

Na Figura 22 é apresentada a análise por energia dispersiva feita na amostra bi-metálica evidenciando a diferença nos teores de cromo da matriz e do carboneto, em percentuais de peso (wt%) e o respectivo desvio padrão (σ) de cada elemento.

Figura 22 – a) Imagem de análise por Energia dispersiva (EDS) de carboneto de cromo b) Imagem de análise por Energia dispersiva (EDS) de matriz austenítica

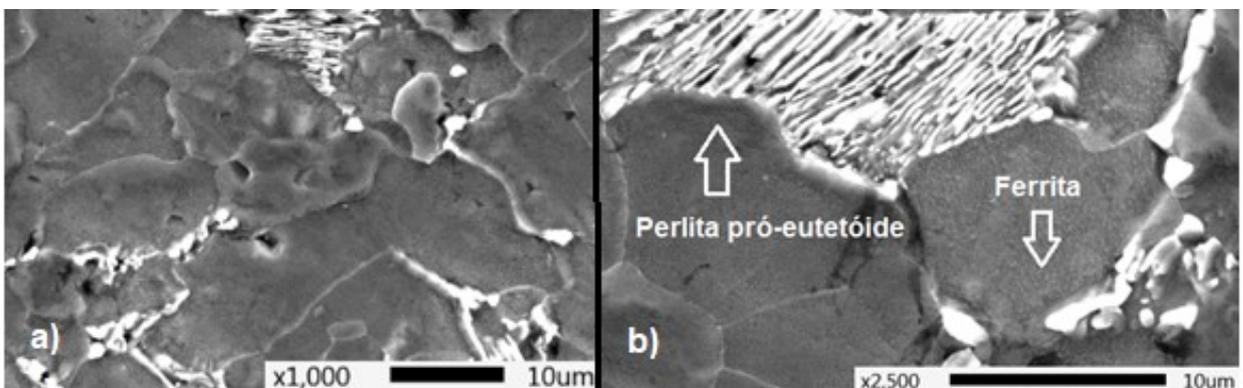


Fonte: Próprio autor.

O elevado teor de carbono (acima de 2,5%) e de cromo (20%) foi responsável por promover a formação de carbonetos primários do tipo M_7C_3 . Com a realização dos ensaios de EDS, notou-se os percentuais de cromo mais concentrados presentes nos carbonetos (35-40%) e na matriz (7-10%), diferenciando estas estruturas quanto à dureza e resistência ao desgaste abrasivo.

Na Figura 23 é apresentada a microestrutura da amostra de ASTM A-36 com diferentes ampliações.

Figura 23 – a) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra ASTM A-36 – 1000x b) Imagem de MEV da microestrutura geral da amostra ASTM A-36 – 2500x



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar um maior tamanho de grão em relação as outras amostras analisadas neste trabalho e a microestrutura predominantemente ferrítica, típica de um aço baixo carbono (0,18%C) com alguns grãos de perlita hipo-eutetóide. Esta

microestrutura é caracterizada por baixa dureza (200 HV) e resistência mecânica ao escoamento (250 MPa).

5.2 Abrasivo

Serão apresentados os resultados obtidos nas análises das propriedades do abrasivo à base de quartzo fabricado segundo NBR 7214.

5.2.1 Granulometria

A partir da classificação granulométrica dos abrasivos obteve-se os resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Distribuição Granulométrica areia – Antes dos ensaios

NBR - NM 248						
Número	Série	ASTM	Malha (um)	Retido (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
3	Normal	30	600	5,42	0,5%	0,5%
2	Normal	50	300	964,49	96,4%	97,0%
1	Normal	100	150	27,37	2,7%	99,7%
0	Fundo	Fundo	Fundo	2,72	0,3%	100,0%
Total				1000	100,00%	-
DMC (< 5%)					0,6 mm	

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Distribuição Granulométrica areia – Após os ensaios

NBR - NM 248						
Número	Série	ASTM	Malha (um)	Retido (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
3	Normal	30	600	2,43	0,2%	0,2%
2	Normal	50	300	960,02	96,0%	96,2%
1	Normal	100	150	26,07	2,6%	98,9%
0	Fundo	Fundo	Fundo	11,48	1,1%	100,0%
Total				1000	100,00%	-
DMC (< 5%)					0,6 mm	

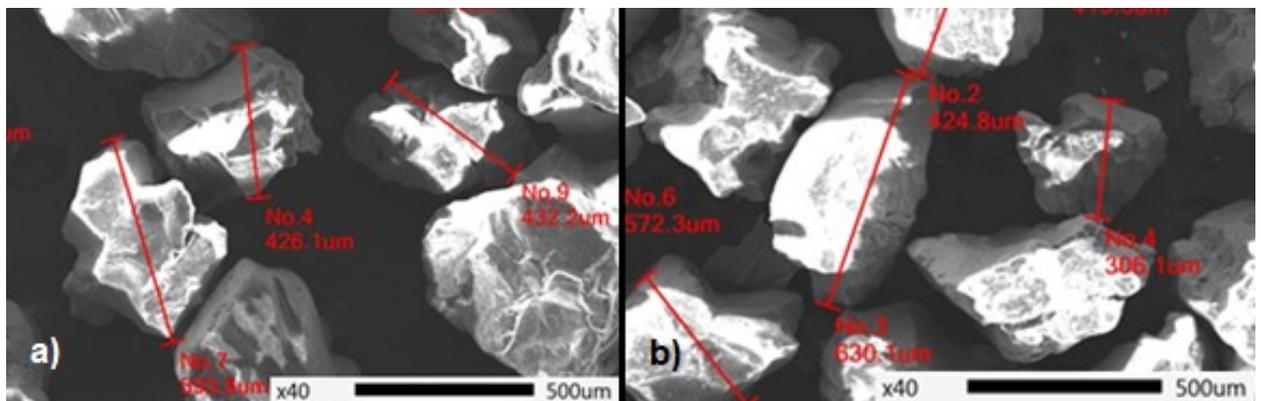
Fonte: Próprio autor.

A maior parte do abrasivo teve sua granulometria inalterada após o ensaio, com um aumento mínimo na quantidade de finos (abaixo 0,15 mm) após os ensaios de desgaste.

5.2.2 Morfologia

Segundo Petrica (2013), é importante observar as características físicas e químicas do abrasivo utilizado afim de avaliar alguma alteração que possa afetar o desgaste, como angulosidade e teor de minerais duros. Após os ensaios de desgaste não foram observadas alterações morfológicas significativas nos grãos quanto ao tamanho ou forma, como observado nas microscopias eletrônicas de varredura mostradas na Figura 24.

Figura 24 – a) Imagem de MEV da morfologia dos grãos de areia – como recebido. b) Imagem de MEV da morfologia dos grãos de areia – pós-ensaio ASTM G-65



Fonte: Próprio autor.

O desgaste para a roda de borracha se situou em baixa tensão devido à não fragmentação do abrasivo em quantidade considerável, fato que foi comprovado também pelo ensaio de peneiramento após os ensaios de desgaste.

5.3 Ensaios de desgaste por abrasão (ASTM G65-16)

Serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios de desgaste por abrasão (ASTM G-65).

5.3.1 Taxas de desgaste (perda de massa)

Com a realização dos ensaios de desgaste, os resultados de perda volumétrica obtidos estão apresentados na Tabela 8.

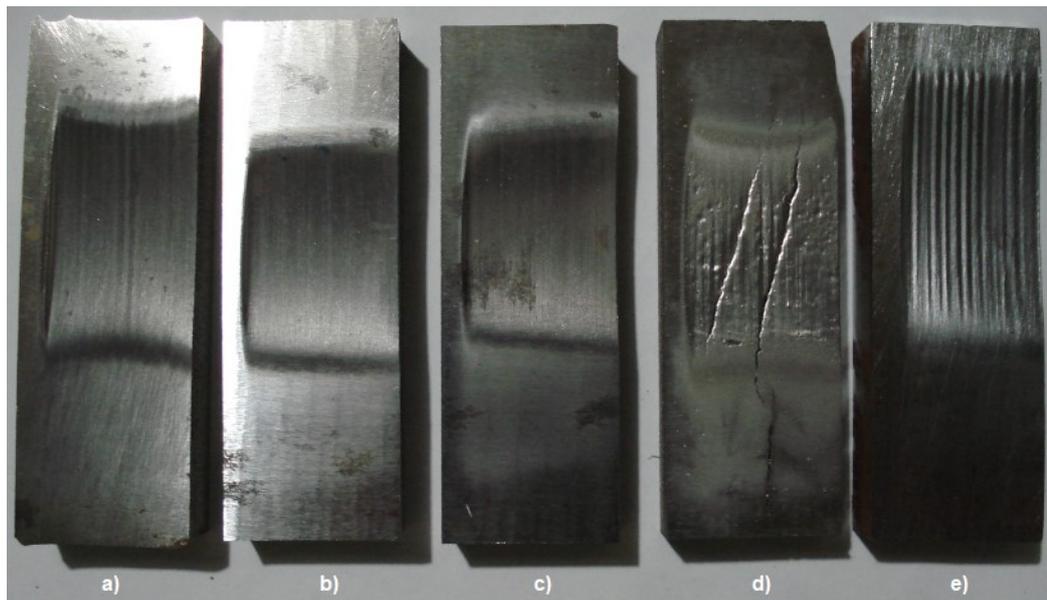
Tabela 8 - Perda volumétrica (mm³) por liga ensaiada no ensaio abrasivo.

	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Média	Desvio Padrão
A-36	513,25	535,39	577,03	547,66	543,33	26,60
AR450	438,75	424,17	492,28	479,29	458,62	32,36
AR500	367,82	364,88	362,74	366,39	365,46	2,18
AR600	380,60	349,59	330,05	347,97	352,05	20,99
Bi-metálico	37,04	48,92	39,63	45,69	42,82	5,45

Fonte: Próprio autor.

Após realização dos ensaios de desgaste, as trilhas obtidas podem ser observadas na Figura 25.

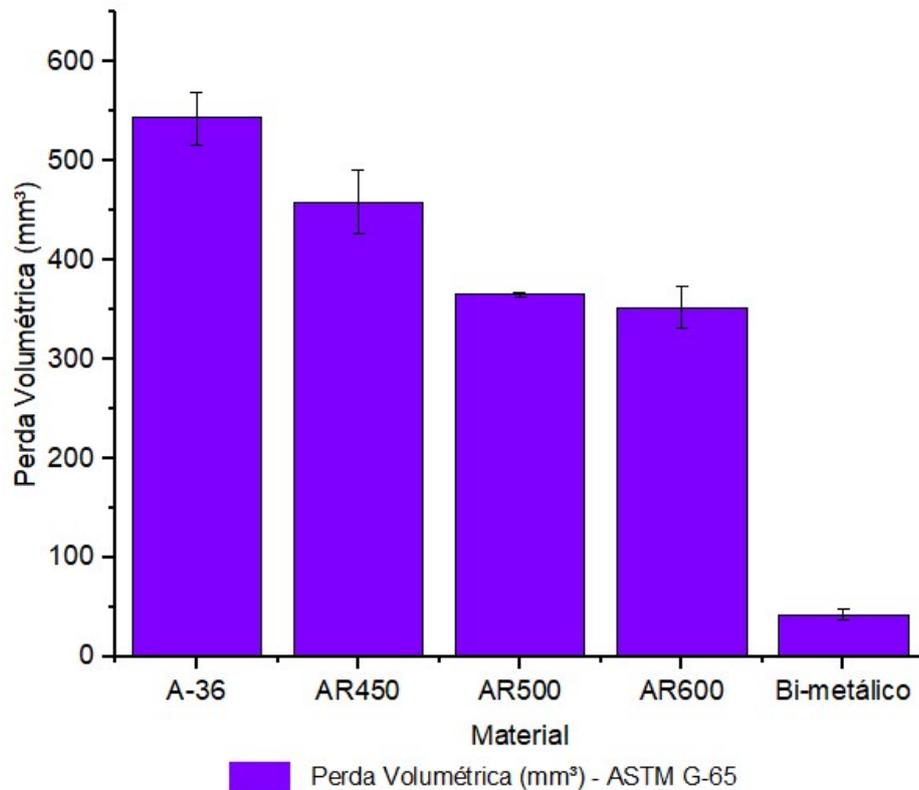
Figura 25 – Corpos de prova provenientes do ensaio ASTM G-65: a) AR450, b) AR500, c) AR600, d) Bi-metálico e e) ASTM A-36



Fonte: Próprio autor.

Apresenta-se na Figura 26 a perda volumétrica de cada revestimento causado pelos ensaios de desgaste.

Figura 26 - - Perda Volumétrica por liga ensaiada – ASTM G-65



Fonte: Próprio autor.

Como observado nos materiais avaliados no trabalho, a falta de homogeneidade micro estrutural do revestimento, uma variação no perfil de dureza do material, mudança na dureza do abrasivo (devido a dureza relativa) e a condição de trabalho alternando entre impacto e abrasão também podem afetar a performance.

5.3.2 Micro mecanismos de desgaste (MEV)

Para análise das microscopias eletrônicas de varredura após os ensaios de desgaste é necessário o conceito de dureza relativa (HR). Segundo Mouritz e Hutchings (1989) e SSAB (2009) a dureza do abrasivo à base de quartzo é de 1100 HV.

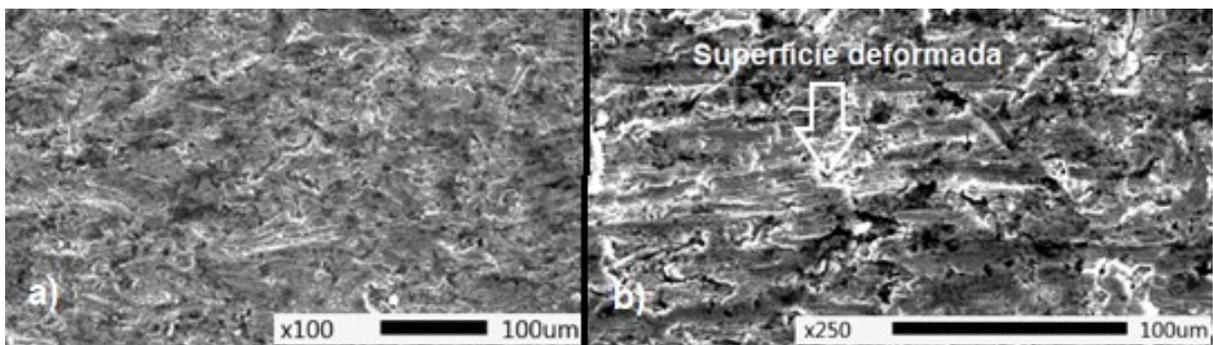
Segundo Zum Gahr, (1987), a dureza relativa é um parâmetro que descreve à que nível o desgaste ocorre, sendo que para materiais homogêneos (AR e ASTM A-36) o valor de transição entre baixo e alto nível é de 1,0 e 1,2, e para materiais não-homogêneos compostos de matriz e carbonetos (CCO), o valor de transição entre baixo e alto nível é geralmente entre 0,8 e 1,5.

Além de determinar a intensidade do desgaste, este valor de dureza relativa determina os micro mecanismos de desgaste, a rugosidade do corpo desgastado e à capacidade do material suportar a deformação superficial (RABINOWICZ, 1966).

Segundo Mutton e Watson (1982) a variação na dureza do revestimento altera os micro mecanismos de desgaste, a intensidade do desgaste e causa uma transição entre micro corte, micro sulcamento e micro trincamento.

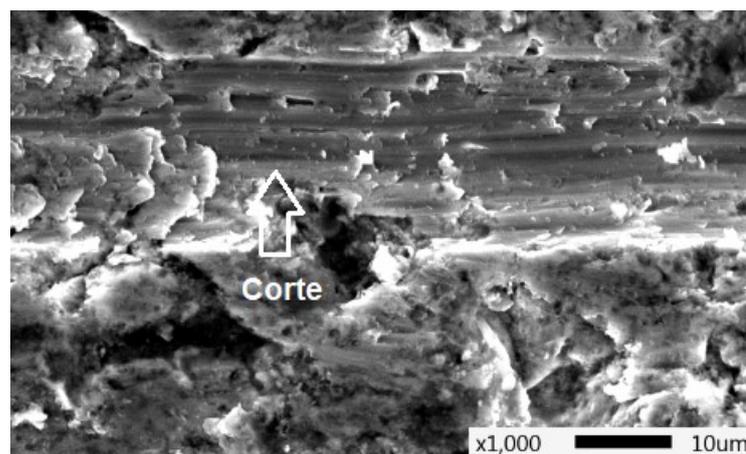
Após os ensaios de desgaste dos revestimentos, foram realizadas as microscopias eletrônicas de varredura, da amostra de aço A-36, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – a) Imagem de MEV da amostra A-36 – Ampliação de 100x b) Imagem de MEV da amostra A-36 – Ampliação de 250x



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Amostra A-36 – Ampliação de 1000x



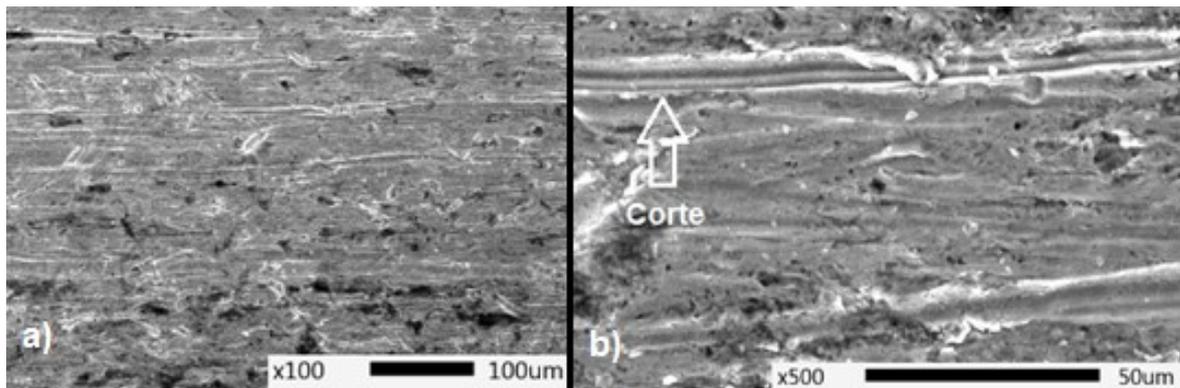
Fonte: Próprio autor.

Para a amostra ASTM A-36 observa-se uma acentuada deformação plástica superficial do revestimento pelas impressões e sulcamentos que os grãos de areia (1100 HV) causaram devido à baixa dureza superficial (120 – 160 HV). O material

de revestimento possui baixa dureza, e com dureza relativa(HR) de 11 ocorre o desgaste em alto nível por micro corte (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 29 apresenta imagens de MEV para a trilha formada na amostra do aço AR450.

Figura 29 – a) Imagem de MEV da amostra AR450 – Ampliação de 100x b) Imagem de MEV da amostra AR450 – Ampliação de 500x



Fonte: Próprio autor.

No material AR450 observa-se que as impressões na superfície ainda existem, mas diminuíram consideravelmente comparadas ao ASTM A-36, devido ao aumento da dureza superficial. O desgaste abrasivo causou riscos no material (micro corte) que indicam a trajetória das partículas. Com dureza relativa de 2,65 o material ainda apresenta desgaste em alto nível, com significativa perda de massa no ensaio, porém devido à sua maior resistência mecânica, o mesmo praticamente não apresenta partículas abrasivas aderidas que, usualmente, deformam a superfície. A superfície do revestimento, não se deforma plasticamente como mostrado no material ASTM A-36.

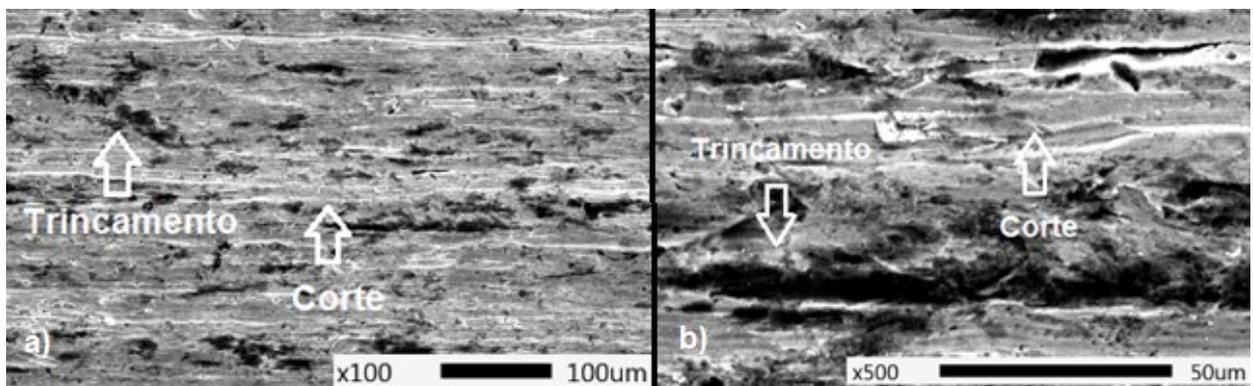
O desgaste ocorre através de micro cortes na superfície do material, onde o grão de abrasivo, corta e desloca para as laterais o material do sulco. Os micro cortes são observados quando a dureza relativa ainda está alta (maior que 2), ou seja, o abrasivo ainda possui dureza muito superior ao revestimento.

A Figura 30(a) apresenta imagens de MEV para trilha formada na amostra do aço AR500. A deformação plástica não é evidente devido à dureza elevada (480 HBW) do revestimento, diferente do observado no ASTM A-36, e nota-se uma transição entre os micro mecanismos de desgaste alternando de micro sulcamento para micro

trincamento. Com dureza relativa de 2,27 o desgaste ainda ocorre em alto nível, porém com uma perda de massa menor que no AR450.

Na Figura 30(b) são observadas algumas micro trincas no revestimento, que são pequenas depressões mais escuras, onde o abrasivo excedeu o limite de escoamento do revestimento naquele ponto conforme Kulu et al. (2009), causando o surgimento de uma pequena trinca pela fragilidade do revestimento (micro trincamento). Porém, nota-se que a magnitude destes trincamentos não são profundos, o que não promove uma acentuada perda de massa.

Figura 30 – a) Imagem de MEV da amostra AR500 – Ampliação de 100x b) Imagem de MEV da amostra AR500 – Ampliação de 400x

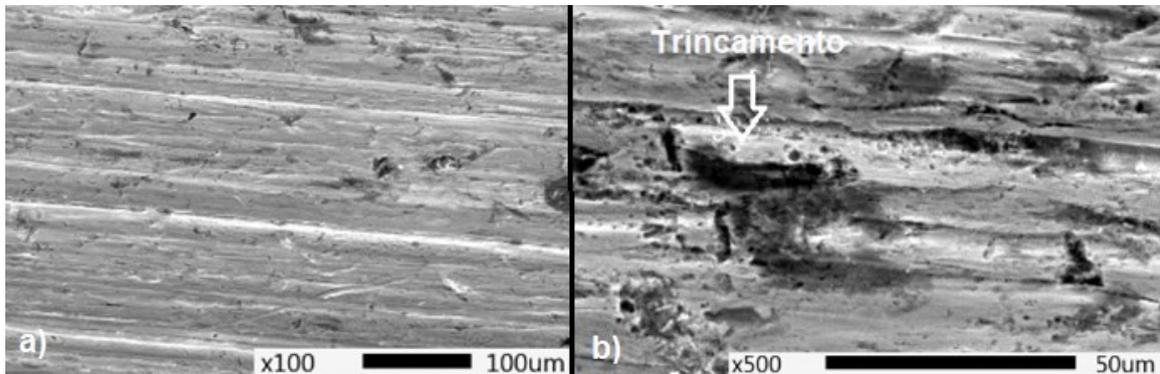


Fonte: Próprio autor.

A Figura 31(a) apresenta imagens de MEV para trilha formada na amostra do aço AR600. É observado menor deformação superficial, sendo os micro mecanismos de desgaste presentes ainda o micro sulcamento e o micro trincamento provenientes da alta dureza. Este material apresenta perda de massa comparável ao AR500 (352,05 mm³ para AR600, contra 365,46 mm³ do AR500) devido à dureza relativa de 1,83, porém se distingue claramente do material com 500 HBW em termos micro estruturais (predominantemente martensítico).

Na Figura 31(b) nota-se a magnitude dos micro trincamentos responsáveis pela perda de massa, agora em maior escala que o AR500.

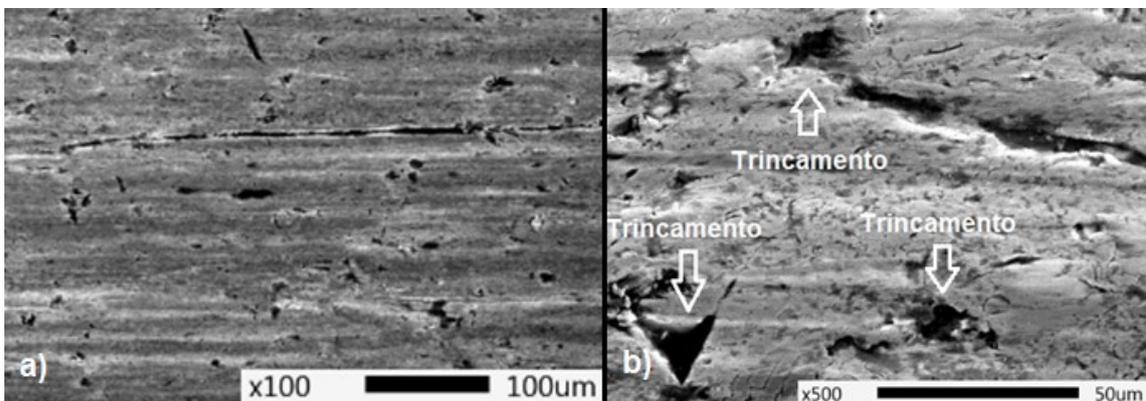
Figura 31 – a) Imagem de MEV da amostra AR600 – Ampliação de 100x b) Imagem de MEV da amostra AR600 – Ampliação de 500x



Fonte: Próprio autor.

A Figura 32(a) apresenta imagens de MEV para trilha formada na amostra do aço bi-metálico revestido (CCO). Observa-se um menor riscamento e deformação plástica devido a presença de carbonetos de cromo de alta dureza dispersos na matriz do revestimento como indicado na Figura 22 da microestrutura deste material.

Figura 32 – a) Imagem de MEV da amostra Bi-metálica – Ampliação de 100x b) Imagem de MEV da amostra Bi-metálica – Ampliação de 500x



Fonte: Próprio autor.

Devido à esta dureza elevada há uma dificuldade na penetração de abrasivos no revestimento não ocorrendo o micro corte, apenas deformando o mesmo plasticamente sem remoção de material (micro sulcamento). Neste caso, a perda de massa acentuada ocorre de forma mais intensa por micro trincamentos ao longo da superfície.

Na Figura 32(b) observa-se as trincas do material e praticamente nenhum riscamento pois trata-se de uma superfície dura (660 – 800 HV). Apesar da alta resistência ao desgaste por micro corte e micro sulcamento, segundo Silva (2016), em operações com impacto moderado o revestimento não resiste bem ao desgaste

devido ao excesso de micro trincamentos e uma matriz de baixa ductibilidade. E ainda conforme Tabor (1964), estes micro trincamentos favorecem a progressiva perda de massa por fratura frágil dos carbonetos.

Para revestimentos não homogêneos, segundo Zum Gahr (1987), Figura 2, a transição do desgaste de baixo para alto nível se inicia e termina quando o abrasivo supera a dureza da matriz e dos carbonetos respectivamente. Isso determina o fato de que em materiais não homogêneos a transição para alto nível se inicie em uma dureza relativa menor (0,8), comparada ao material homogêneo (1) (onde basta o abrasivo superar a dureza do próprio material).

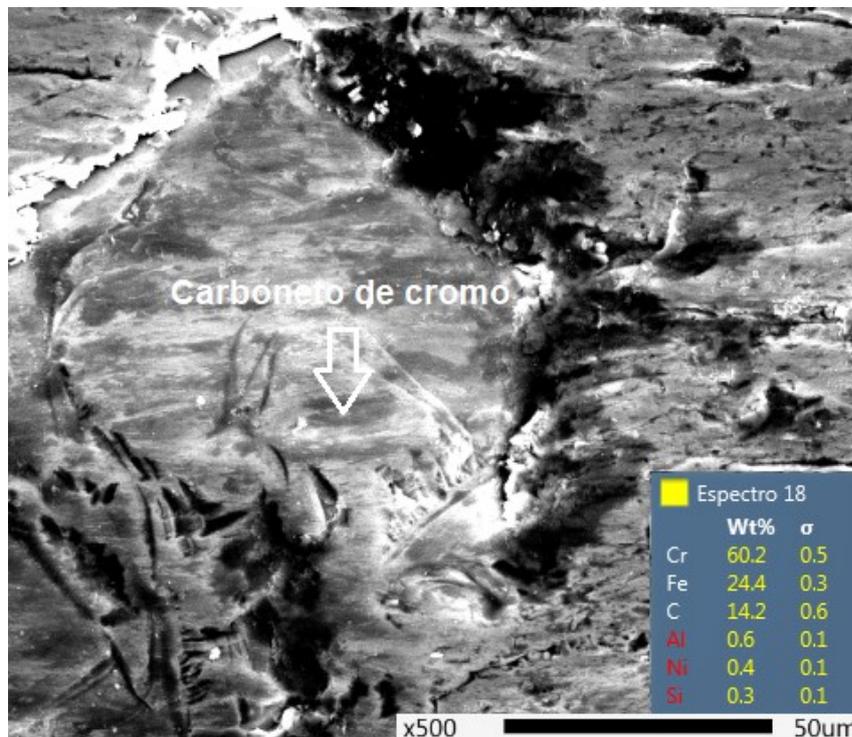
Neste caso, como indicado na Figura 2, a curva de transição para estes materiais aparece mais larga, com a dureza relativa variando entre 0,8 à 1,5, devido ao fato da maior dureza localizada dos carbonetos, além de que, comparando materiais de mesma dureza, tem-se que os materiais não homogêneos possuirão uma matriz mais macia causando o início da transição em dureza relativa mais baixa.

A perda de massa para este revestimento foi baixa comparada com outros materiais, devido à transição entre desgaste de baixo e alto nível deste revestimento variar de 0,8 (matriz com 650 HV) à 2,5 (carbonetos com 2000 HV), e de forma geral se situar em 1,7 (na fase de transição). Desta forma observa-se que a resistência à abrasão, mensurada no ensaio ASTM G-65 chega a ser superior em aproximadamente 10 vezes para o material AR600.

Relacionando a microestrutura dos revestimentos ensaiados pelo MEV com as perdas de massa encontradas (fator de influência na vida útil), estima-se que a queda da dureza relativa (abrasivos mais macios) possa apresentar outros resultados de resistência ao desgaste. Abrasivos com dureza próxima à 600-700 HV (ex.: minério de ferro) são comuns nas operações de extração, transporte e beneficiamento de agregados minerais, propiciando ao material AR ligados ao boro bons resultados de durabilidade.

Na Figura 33, ressalta-se a magnitude dos micro trincamentos tratados nas imagens anteriores, o que causa deslocamentos de carbonetos de cromo (estruturas de alta dureza), presentes na chapa bi-metálica como indicado no resultado do EDS

Figura 33 – Imagem de MEV análise por Energia dispersiva (EDS) carboneto de cromo – Ampliação de 500x



Fonte: Próprio autor.

Nas microscopias eletrônicas de varredura, observa-se que em cada material o desgaste ocorre por meio de um micro mecanismo específico.

Pelos ensaios de abrasão, a transição dos micro mecanismos de desgaste é observada, passando desde o micro corte com impressões (mecanismos de deformação plástica), e com cortes causados por alguns grãos de areia de alta dureza (1100 HV), chegando ao micro trincamento devido à dureza elevada da matriz e a perda da tenacidade que levam a ocorrência de micro trincamento/lascamento, seguindo à ordem crescente de dureza superficial das amostras indicada nos ensaios.

6 CONCLUSÃO

Pelos ensaios ASTM G-65, os micro mecanismos de desgaste e o conjunto de análises executadas conclui-se que:

- Foi observado estrutura martensítica no material laminado baixa liga ao boro, estrutura mista de carbonetos em uma matriz austenítica no material bi-metálico e estrutura ferrítica no aço ASTM A-36 usado como referência.
- As durezas dos aços baixa liga ao boro aumentaram progressivamente com o teor de carbono sendo 410(0,18%C) 480(0,24%C) 570(0,4%C), HBW. A dureza encontrada para o material bi-metálico foi em torno de 700 HBW para matriz e a dureza localizada de 2000 HV nos carbonetos.
- As composições químicas encontradas estavam dentro do estipulado pelos fabricantes para todos materiais ensaiados.
- Nos ensaios de desgaste o material bi-metálico apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo. A vida útil igual a 1 em referência ao ASTM A-36 foi de: AR450 (1,2), AR500 (1,5), AR600 (1,6) e Bi-metálico (12,7).
- O abrasivo utilizado no ensaio à base de quartzo, afeta os resultados de desgaste pela relação de dureza com os revestimentos (dureza relativa), causando sempre um desgaste em alto nível para os revestimentos temperados. No revestimento bi-metálico notou-se um desgaste menor, devido a menor dureza relativa (faixa de transição). A morfologia e a granulometria do abrasivo foram conservadas após os ensaios.
- Após os ensaios de desgaste ASTM G-65, para os aços temperados (AR) observou-se um desgaste por micro corte (responsável por maior perda de massa) e alguma deformação plástica superficial reduzindo em magnitude com o incremento da dureza, passando posteriormente ao micro sulcamento. O revestimento bi-metálico apresentou predominantemente micro trincamento e ausência de deformação plástica superficial devido à elevada dureza (700 HBW).

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ensaiar os materiais de revestimento com diferentes abrasivos alterando a relação de dureza relativa.
- Realizar comparação dos revestimentos bi-metálico e AR600 em condições de moderado e alto impacto.
- Avaliar o desgaste em camadas inferiores à camada superficial do material bi-metálico, além de materiais com mais de um passe de soldagem depositado para avaliação da resistência ao desgaste abrasivo devido a uma possível diluição dos elementos de liga no material base.
- Avaliar o desgaste em camadas inferiores à camada superficial de materiais AR de diferentes fabricantes, a fim de avaliar a resistência ao desgaste abrasivo devido a uma possível diminuição da taxa de resfriamento no núcleo da chapa, promovendo alterações na microestrutura e no perfil de dureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHARD, J. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of applied physics**, v. 24, n. 8, p. 981-988, 1953.
- ASTM International. "Standard Test Method for Measuring Abrasion Using The Dry Sand/Rubber Wheel Aparatus". ASTM G65-16, 14p., 2016
- BADISCH, E. et al. Wear behaviour of hardfaced Fe-Cr-C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature. **Tribology International**, v. 43, n. 7, p. 1234-1244, 2010.
- BIALOBRZESKA, B.; KOSTENCKI, P. Abrasive wear characteristics of selected low-alloy boron steels as measured in both field experiments and laboratory tests. **Wear**, v. 328, p. 149-159, 2015.
- BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LEON, L. M.; TORO, A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. **Science Direct - Wear**, v. 259, n. 1, p. 52-61, 2005.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. São Paulo: LTC, 2007. 739p.
- CHATTERJEE, S.; PAL, T. K. Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron. **Wear**, v. 255, n. 1, p. 417-425, 2003.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599p.
- CHOO, Seong-Hun et al. Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of hardfacing alloys reinforced with complex carbides. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31, n. 12, 2000, p. 3041-3052.
- CROOK, Paul; FARMER, Howard N. Friction and wear of hardfacing alloys. **ASM International**, v. 18, 1992, p. 758-765.
- DEKETH, Hendrik Jan Reinout. Wear of rock cutting tools: laboratory experiments on the abrasivity of rock. **AA Balkema**, 1995.
- DENG, Xiang-tao et al. Microstructure and abrasive wear behavior of medium carbon low alloy martensitic abrasion resistant steel. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 21, n. 1, p. 98-103, 2014.
- DIETER, G. E.; BACON, D. J. **Mechanical metallurgy**. New York: McGraw-Hill, 1986, 653p.
- EVANS, I.; POMEROY, C. D. The strength, fracture and workability of coal. **Pergamon Press**, 1966.
- FANG, L. et al. Predicting three-body abrasive wear using Monte Carlo methods. **Wear**, v. 256, n. 7, p. 685-694, 2004.

GREGORY, E. N. - **Selection of Materials for Hardfacing**. Welding Surfacing and Hardfacing. The Welding Institute, 1980, 88 p.

HAWK, J. A. et al. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. **Wear**, v. 225, p. 1031-1042, 1999.

HERNÁNDEZ, O. J. S. **Otimização do consumível na solda de revestimento aplicada na indústria sucroalcooleira**. 1997. 102 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 1997.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**.

London: Edward Arnold, 273p, 1992.

IBRAM. Informações sobre a economia mineral Brasileira 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 27 novembro 2017.

JACKSON, R. S. Austenite liquidus surface and constitutional diagram for the iron-chromium-carbon metastable system. **Journal of the iron steel institute**, v. 208, n. 2, p.163-167, 1970.

JOST, H. Peter. **Lubrication (tribology), Education & Research: A Report on the Present Position & Industry's Needs**. HM Stationery Office, 1966.

KÄSLING, H.; THURO, K. Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory. In: 11TH IAEG CONGRESS, Auckland, New Zealand. **Proceedings...** New Zealand, 2010. p. 1973-1980.

KRAUSS, George. **Steels: heat treatment and processing principles**. ASM International, 1990, p. 497, 1990.

KULU, P. et al. Abrasivity and grindability study of mineral ores. **Wear**, v. 267, n. 11, p. 1832-1837, 2009.

LEITE, R.; MARQUES, P. V. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de duas ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arames tubulares. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação. **Anais...** V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 9p., Belo Horizonte, 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**, v. 14, n. 2, p. 140-150, 2009.

MADDIN, R.; COTTRELL, A. H. LXXXIII. Quench hardening in aluminium single crystals. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 46, n. 378, p. 735-743, 1955.

MARTINS FILHO, A. S. **Soldagem de revestimentos com arame tubular**. 1995. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 1995.

Lindroos, M., Ratia, V., Apostol, M., Valtonen, K., Laukkanen, A., Molnar, W., Kuokkala, V. T. The effect of impact conditions on the wear and deformation behavior of wear resistant steels. **Wear**, v. 328, p. 197-205, 2015.

MOURITZ, A. P.; HUTCHINGS, I. M. The abrasive wear of steel during rolling-sliding contact with rock counterfaces. **Wear**, v. 134, n. 1, p. 99-113, 1989.

MUTTON, P. J.; WATSON, J. D. Abrasive wear mechanisms in steels. **Journal of Lubrication Technology**, v. 104, p. 9, Jan. 1982.

NBR, N.M. 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Associação brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 13p. 2003.

OJALA, N., VALTONEN, K., HEINO, V., KALLIO, M., AALTONEN, J., SIITONEN, P., KUOKKALA, V. T. Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels. **Wear**, v. 317, n. 1, p. 225-232, 2014.

PARANHOS, R. P. R.; MELLO, R. S. T.; PAYÃO FILHO, J. C. Influência dos parâmetros de soldagem com arco submerso empregando fluxo ligado e arame de aço-C nas características de revestimento de ligas Fe-Cr-C resistentes ao desgaste abrasivo. In: XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1998. **Anais... XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem**. 1998.

PETRICIA, M.; BADISCH, E.; PEINSITT, T. Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. **Wear**, v. 308, n. 1, p. 86-94, 2013.

PLINNINGER, R. J.; SPAUN, G.; THURO, K.. Prediction and Classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In: ENGINEERING GEOLOGY FOR DEVELOPING COUNTRIES. **Proceedings... 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment**, Durban. 2002. p. 16-20.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. Cambridge, Massachussets, John Wiley, 1966, 243p.

RADI, Polyana Alves et al. Tribologia, conceitos e aplicações. In: 13° Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, 2007. **Anais... XIII ENCITA**, 2007.

RAMALHO, A.; MIRANDA, J. C. The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. **Wear**, v. 260, n. 4, p. 361-367, 2006.

REED-HILL, R. E; ABBASCHIAN, R. **Physical metallurgy principles**. 4. ed. USA: Cengage Learning, 2008, 750p.

RENDÓN, J.; OLSSON, M. Abrasive wear resistance of some commercial abrasion resistant steels evaluated by laboratory test methods. **Wear**, v. 267, n. 11, p. 2055-2061, 2009.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C- Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. 104p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo. 2004.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e dolomito. **Rochas e Minerais Industriais**, v. 1, cap. 16, p.363-390, 2005.

SHAKELFORD, J F. – **Introduction to Materials Science for Engineers**, 4 ed., New Jersey: Printice Hall, 1996. 550p.

SILVA, G. N. da. **Efeito da substituição do molibdênio pelo nióbio e nióbio-boro em aços Hadfield no desempenho ao desgaste abrasivo**. 2004. 99f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2004.

SILVA, R. J. **Caracterização de sistema tribológico e seleção de ligas para revestimento de chutes de transferência de minérios**. 2016. 91f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

SSAB. Hardox on site: quarry and open pit mine. 2009. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: 13 abril 2017.

SSAB. Data sheet 168en Hardox 450/500/600. 2013. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: 13 abril 2017.

SSAB. General product information Weldox, Hardox, ArmoX and Toolox. v. 11, 2011. Disponível em: < <http://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/toughness>>. Acesso em: 07 junho 2017.

STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G. W. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear. **Wear**, v. 249, n. 3, p. 201-207, 2001.

STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS, I. M. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. **Wear**, v. 195, n. 1-2, p. 232-240, 1996.

TABOR, D.; BOWDEN, F. P. The friction and lubrication of solids II. **Clarendon Press**, Oxford, v. 19, p. 64, 1964.

THORPE, W. R.; CHICCO, B. The Fe-rich corner of the metastable C-Cr-Fe liquidus surface. **Metallurgical Transactions A**, v. 16, n. 9, p. 1541-1549, 1985.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, v. 225, p. 205-214, 1999.

VAZQUEZ, C. R. Comportamiento frente al desgaste abrasivo de las aleaciones con tendencia a la formación de carburos aplicadas por soldadura. **Mantenimiento: Ingeniería Industrial y de Edificios**, n. 134, p. 5-12, 2000.

VIEGAS, D. B. **Avaliação da resistência ao desgaste de um aço Hardox® 450 submetido a solda de revestimento duro, com arame tubular DIN 8555/MF-10-GF-60-GR utilizando o processo FCAW**. 2016. 104f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016

WILSON, R. D.; HAWK, J. A. Impeller wear impact-abrasive wear test. **Wear**, v. 225, p. 1248-1257, 1999.

WINER, W. O. Future trends in tribology. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 19-27, 1990.

WOLDMAN, M. et al. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behaviour. **Wear**, v. 294, p. 419-426, 2012.

XIE, Yongsong; BHUSHAN, Bharat. Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing. **Wear**, v. 200, n. 1-2, p. 281-295, 1996.

ZUM GHAR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Tribology Series. v.10, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 560p.

ZDRAVECKÁ, E. et al. Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels. **Research in Agricultural Engineering**, v. 60, n. 3, p. 115-120, 2014.