



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO
DESGASTE ABRASIVO UTILIZANDO UM ABRASÔMETRO
DE TAMBOR DE REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADOS
POR SOLDAGEM E DE AÇOS HARDOX®**

MATEUS CODOGNOTTO CUNHA

Belo Horizonte, 10 de abril de 2018

C972a

Cunha, Mateus Codognotto.

Análise comparativa da resistência ao desgaste abrasivo utilizando um abrasômetro de tambor de revestimentos duros depositados por soldagem e de aços hardox [manuscrito] / Mateus Codognotto Cunha. – 2018. 93 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 89-93.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Desgaste abrasivo - Teses. 3. Aço de alta resistência - Teses. 4. Revestimentos protetores - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

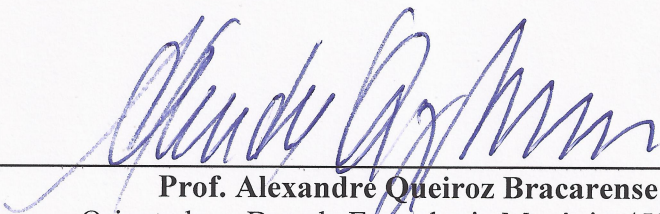
**"ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE
ABRASIVO UTILIZANDO UM ABRASÔMETRO DE TAMBOR DE
REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADOS POR SOLDAGEM E DE
AÇOS HARDOX®"**

MATEUS CODOGNOTTO CUNHA


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**".

Dissertação aprovada no dia 10 de abril de 2018.

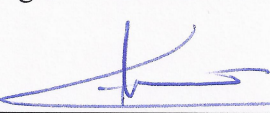
Por:



Prof. Alexandre Queiroz Bracarense
Orientador - Dpt. de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Zirlene Alves da Silva Santos
Dpt. de eng. controle e automacao e tec. fundamentais/ UFOP



Prof. Cláudio Turani Vaz
Dpt. de Engenharia de Materiais/ CEFET-MG

MATEUS CODOGNOTTO CUNHA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE ABRASIVO UTILIZANDO UM
ABRASÔMETRO DE TAMBOR DE
REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADOS POR
SOLDAGEM E DE AÇOS HARDOX®**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

A meus pais e irmãos pelo
amor e carinho.

A minha esposa e minhas filhas
Maria Luiza e Alice que tanto amo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo seu infinito amor e misericórdia. Pela graça da oportunidade de fazer esse mestrado e ter me sustentado nos momentos difíceis.

Aos meus pais Jorge Passálio Cunha e Maristela Codognotto Cunha, pelo amor e carinho comigo, pelas correções nos momentos oportunos, por ser exemplo a ser seguido de caráter, integridade, honestidade e humildade e também pelas orações. Não posso deixar de agradecer por olharem minhas filhas e cuidarem delas com tanto amor durante esses anos, enquanto me dedicava ao mestrado. E claro, por me ajudarem a ser quem eu sou hoje. Aos meus irmãos, Camila e Tiago, pelo apoio e companheirismo. Aos meus familiares, pela torcida e orações.

À minha esposa Georgia, pelo amor e pelo cuidado comigo. Por ser tão compreensiva e paciente e me incentivar sempre a continuar e seguir em frente com o mestrado. Por me ajudar por muitas vezes a enxergar aquilo que realmente eu queria.

À Comunidade Católica Mater Crucis, da qual faço parte, pela intercessão e constantes orações. Pela paciência com minhas ausências. Tenham certeza que milagres aconteceram nesse mestrado por intermédio da nossa Mater.

Ao meu orientador Professor Alexandre Queiroz Bracarense pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos. Por ter permitido eu ser seu aluno por todos esses anos e pela paciência comigo. E por me incentivar a seguir com o projeto de construção do abrasômetro.

Ao LRSS/UFMG – Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, por me acolher e pela estrutura fornecida para realização desse projeto. Principalmente aos amigos de laboratório que tanto me auxiliaram ao longo do mestrado, pelo companheirismo e principalmente pelo apoio na construção do abrasômetro. Em especial, Gabriel Mendes Carvalho, Andrés Mauricio Uribe, José Gedael, Nilo Nogueira, Pedro Menezes, Ariel Arias, Frank Mello, Fagner Coelho, Marcelo Teodoro, Luana Araújo, Luciano Juliani e Fernando Avelar, Diego Corradi e Diogo Souza. A toda a equipe!

À ESAB IND. E COM. LTDA. e à EUTECTIC CASTOLIN pela doação dos consumíveis, pela estrutura para soldagem dos corpos de prova e pelos ensaios realizados. Em especial agradeço ao José Roberto Domingues, Ronaldo Cardoso Junior, Ricardo Vinícius de Melo Leite, Rodrigo Sanches de Oliveira e ao soldador Antônio Edmar. Aos amigos que fiz nessa grande empresa durante os cinco anos que lá trabalhei.

À SSAB pela doação das chapas de Hardox® e pelo apoio na idealização do abrasômetro, em especial ao Eng. Leonardo Vieira.

Ao Laboratório de Difração de Raio-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, em especial ao Samuel e ao Professor Vicente Buono.

Ao Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, em especial ao Alberto.

Ao NANOLAB/UFOP pela realização dos ensaios no MEV, em especial aos professores Gilberto Álvares e Fernando Gabriel.

Aos professores da UFOP, em especial do DECAT e DEMEC. Obrigado pelos ensinamentos e por me ajudarem nesse início de carreira como docente.

Aos professores Cláudio Turani Vaz e Zirlene Alves da Silva Santos por participarem da banca e por contribuírem com seus conhecimentos e experiência através das observações e orientações na correção do texto da dissertação.

Ao PPGMEC/UFMG pela oportunidade de realização desse mestrado.

Meus agradecimentos por fazerem parte da realização desse sonho!

*“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam humildes.
É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o
Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”*
(Leonardo da Vinci)

“Quero conhecer os pensamentos de Deus... O resto é detalhe.”
(Albert Einstein)

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Desgaste abrasivo	24
2.1.1 Definição	24
2.1.2 Importância do Desgaste Abrasivo.....	26
2.1.3 Regime e Mecanismos de Desgaste Abrasivo.....	27
2.1.4 Desgaste abrasivo e efeito da microestrutura	31
2.2 Ensaio de desgaste abrasivo – abrasômetro de tambor.....	33
2.3 Engenharia de Superfícies – técnicas de proteção.....	38
3. METODOLOGIA	42
3.1 Abrasômetro de Tambor (construção).....	42
3.2 Ensaio de Desgaste	46
3.3 Materiais ensaiados.....	50
3.3.1 Revestimento por soldagem.....	51
3.3.2 Aços Hardox®	54
3.4 Preparação e posicionamento dos corpos de prova	56
3.5 Caracterização dos materiais ensaiados.....	60
3.5.1 Difração de Raios X - DRX.....	60
3.5.2 Metalografia.....	61
3.5.3 Ensaio de microdureza.....	63

3.5.4 Ensaio de dureza Rockwell C	63
3.5.5 Pesagem das amostras	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 DRX.....	66
4.1.1 Hardox®	66
4.1.2 Revestimentos por Soldagem	67
4.2 Análises Metalográficas	69
4.2.1 Hardox®	69
4.2.2 Revestimentos por Soldagem	70
4.3 Microdureza.....	79
4.3.1 Dureza nos carbonetos das ligas soldadas	80
4.4 Perda de Massa	82
4.5 Abrasivo pós ensaio.....	86
5. CONCLUSÕES.....	87
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Placas de proteção com revestimento duro fixadas em equipamento para movimentação de minério de ferro.....	20
FIGURA 2.1 - Classificação dos processos de desgaste.	24
FIGURA 2.2 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos.	25
FIGURA 2.3 - Desenho esquemático da classificação do desgaste abrasivo: (a) abrasão a baixas tensões; b) abrasão a altas tensões; (c) abrasão por goivagem.	26
FIGURA 2.4 - Desgaste abrasivo em função da dureza da partícula abrasiva e do material.	27
FIGURA 2.5 - Desenho esquemático dos micromecanismos de desgaste.	29
FIGURA 2.6 - Mecanismos de desgaste observados em microscopia eletrônica de varredura. (a) Microsulcamento; (b) Formação de borda; (c) Microcorte.	29
FIGURA 2.7 - Relação entre microsulcamento e microcorte em função da razão entre o ângulo de ataque e de ataque crítico.	30
FIGURA 2.8 - Atuação da orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade da segunda fase no desgaste abrasivo.	31
FIGURA 2.9 - Desenho esquemático da seqüência de eventos que resultam no microtrincamento dos carbonetos.	32
FIGURA 2.10 - Desenho esquemático do ensaio de desgaste de tambor do tipo Impeller-tumbler.	34
FIGURA 2.11 - a) Posição das amostras no tambor. b) Abrasivo no interior do tambor.	35
FIGURA 2.12 - Técnicas de Proteção estudadas pela Engenharia de Superfície.	38
FIGURA 2.13 - Classificação detalhada dos processos de recobrimento.	39
FIGURA 3.1 - Abrasômetro de tambor construído no LRSS.	43
FIGURA 3.2 - a) Projeto do porta amostra. b) Porta amostras fabricados.	45
FIGURA 3.3 - Esquema do tambor com porta amostras fixados.	45
FIGURA 3.4 - Tacômetro usado na aferição da rotação do tambor e frequência correspondente.	46
FIGURA 3.5 - Curva granulométrica da carga de minério de ferro.	47
FIGURA 3.6 - Amostra de minério de ferro com granulometria selecionada entre 4,75mm e 19,00mm.	48
FIGURA 3.7 - Amostra de minério de ferro pulverizada para análise por DRX.	48
FIGURA 3.8 - Difratoograma da amostra de minério de ferro.	49

FIGURA 3.9 – Carga de minério de ferro no interior do tambor.....	50
FIGURA 3.10 - Equipamento utilizado para soldagem dos corpos de prova.	52
FIGURA 3.11 - Sequência de camadas de revestimento depositadas com direções alternadas.	53
FIGURA 3.12 - a) Posição dos cortes a plasma. b) Corpo de Prova após cortes com a poliacorte. c) Corpo de Prova após etapas de corte e usinagem.....	55
FIGURA 3.13 - a) Chapa de Hardox®. b) Corpo de Prova após etapa de fresamento.	55
FIGURA 3.14 - Limpeza dos CP's através de banho ultrassônico.	57
FIGURA 3.15 - Verificação do alinhamento do cp com o porta amostra.	58
FIGURA 3.16 - Posicionamento dos conjuntos dentro do tambor do abrasômetro.....	59
FIGURA 3.17 - Tambor pronto para o ensaio, com os porta amostras posicionados e os corpos de prova em seu interior.	60
FIGURA 3.18 - Retirada de amostra para análise microestrutural.....	61
FIGURA 3.19 - Microscópio Óptico acoplado à camera.	62
FIGURA 3.20 - Microdurômetro usado nos ensaios de microdureza Vickers.....	62
FIGURA 3.21 - Microdurômetro usado nos ensaios de microdureza Vickers.....	63
FIGURA 3.22 - Durômetro usado nos ensaios de dureza Rockwell C.	64
FIGURA 3.23 - Pesagem dos CP's em balança de precisão.	64
FIGURA 4.1 - Difratograma da amostra de Hardox® 450.	66
FIGURA 4.2 - Difratograma obtido para a Liga A – Fe-C-Cr.	68
FIGURA 4.3 - Difratograma obtido para a Liga B – Fe-C-Cr-B.	69
FIGURA 4.4 - Microestrutura martensítica dos aços Hardox® 450, 500, 550 e 600.	70
FIGURA 4.5 - Macrografia da seção transversal do cp embutido- Liga A.....	71
FIGURA 4.6 - Micrografias da seção transversal do revestimento depositado com a liga A. a) Topo. b) Intermediária. c) Base.	72
FIGURA 4.7 - Macrografia da região inferior do revestimento depositado com a liga A.....	75
FIGURA 4.8 - Macrografia da seção transversal do cp embutido- Liga B.	75
FIGURA 4.9 - Macrografia da região do topo do revestimento depositado com a liga B. a) Topo. b) Intermediária. c) Base.	77
FIGURA 4.10 – Microdurezas realizadas sobre o carboneto (C) e sobre a matriz (M) com seus respectivos valores em Vickers.	81
FIGURA 4.11 - Gráfico de perda de massa após ensaio de desgaste no abrasômetro de tambor. Tempo de ensaio: 90 horas.	83

FIGURA 4.12 - Valores obtidos com a pesagem das amostras antes e depois do ensaio de desgaste para verificação da perda de massa. Unidade: grama.	83
FIGURA 4.13 - Valores obtidos com a pesagem das amostras antes e depois do ensaio de desgaste para verificação da perda de massa.	84
FIGURA 4.14 – a) Superfície de corpo de prova usinada antes do ensaio de desgaste. b) Marcas de desgaste na liga A. c) Marcas de desgaste na liga B.	85
FIGURA 4.15 - Arredondamento das arestas do abrasivo após 18 horas de ensaio.	86

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 - Abrasividade de alguns minerais.....	36
TABELA 3.1 - Parâmetros do ensaio de desgaste com abrasômetro de tambor.....	50
TABELA 3.2 - Análise química dos corpos de prova revestidos de cada liga.....	53
TABELA 3.3 - Análise química da chapa ASTM A36 usada como substrato.	54
TABELA 3.4 - Análise química dos aços Hardox® de alta resistência à abrasão.....	56
TABELA 3.5 - Identificação dos CP's usados no ensaio de desgaste.	57
TABELA 4.1 - Dureza Vickers da superfície para os materiais. Valores em Vickers (HV)...	79
TABELA 4.2 - Dureza Rockwell C da superfície para os materiais Hardox® 450 e 600.....	80
TABELA 4.3 - Tabela com valores de dureza para matriz e carbonetos da Liga A.	81
TABELA 4.4 - Tabela com valores de dureza para matriz e carbonetos da Liga B.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas.
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASP	Arc Spray Process
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CE	Carbono Equivalente
CP	Corpo De Prova
DRX	Difração de Raio-X
EDS	Electron Dispersive Spectroscopy
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HV	Hardness Vickers
HVOF	High Velocity Oxi-Fuel
LRSS	Laboratório De Robótica Soldagem E Simulação
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MMA	Manual Metal Arc
PIB	Produto Interno Bruto
PPGMEC	Programa De Pós Graduação Em Engenharia Mecânica
PSP	Plasma Spray Process
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
UFMG	Universidade Federal De Minas Gerais

NOMECLATURA

d	Diâmetro do eletrodo [mm]
H_a	Dureza do abrasivo
H	Dureza da superfície do material
T	Tamanho do carboneto
D	Distância livre média entre carbonetos
T_{tt}	Tempo total de teste [h]
I_{ta}	Intervalo de tempo entre trocas da carga de abrasivo [h]
α_c	Ângulo de ataque das bordas das partículas de abrasivo [°]
C_a	Carga do abrasivo [kg]
A_t	Tipo de abrasivo
A_{Gr}	Granulometria do abrasivo
A_i	Abrasividade [g/h]
V_R	Velocidade de rotação [rpm]

RESUMO

A mitigação do desgaste está relacionada ao *core business* de indústrias de diversos segmentos como de mineração, cimenteira, sucroalcooleira e siderúrgica. Essas indústrias necessitam de materiais resistentes ao desgaste, uma vez que os equipamentos devem suportar condições extremamente agressivas. Como soluções anti-desgaste em relação ao desgaste abrasivo, se destacam a utilização de revestimentos duros depositados por soldagem e o uso de chapas de elevada resistência à abrasão. O objetivo desse trabalho é avaliar e comparar duas ligas de revestimento duro, uma do sistema Fe-C-Cr e a outra do sistema Fe-C-Cr-B, soldadas pelo processo SMAW e chapas de alta resistência à abrasão com quatro graus de dureza, sendo elas 450, 500, 550 e 600 HBW em relação à resistência ao desgaste abrasivo. A metodologia é dividida em duas partes, sendo a primeira a caracterização dos materiais ensaiados através de análise química, microestrutural e de dureza. A segunda parte consiste na análise comparativa de resistência ao desgaste em ensaio com um abrasômetro de tambor através da perda de massa utilizando minério de ferro como abrasivo. Os resultados alcançados são apresentados e discutidos. Quanto à caracterização, os quatro graus de aço Hardox® apresentavam uma estrutura martensítica na superfície, sendo possível verificar um maior refinamento da martensita para maiores graus de dureza do aço. A microestrutura das ligas soldadas apresentou carbonetos ou boretos primários dos tipos M_7C_3 e $M_{23}(C,B)_6$ envolvidos em uma matriz composta por um constituinte eutético. Comparativamente, a liga do sistema Fe-C-Cr-B apresentou um refinamento da microestrutura e um número visivelmente maior de carbonetos formados. As ligas de revestimento apresentaram maiores valores de dureza superficial e menores desgastes que os Hardox®. Esse resultado era esperado uma vez que nas ligas soldadas tem-se a presença de carbonetos de elevada dureza envolvidos por uma matriz também resistente, o que pode ter sido o diferencial para conferir uma maior resistência à abrasão. Quando comparados entre si, os Hardox® apresentam uma tendência clara na diminuição do desgaste com o aumento da dureza. A liga com adição de boro, apesar de apresentar maiores valores de dureza apresentou também maior desgaste que a liga do sistema Fe-C-Cr. É possível que justamente devido à sua maior dureza associada ao fato de ocorrer uma parcela de desgaste abrasivo por goivagem (impacto), um mecanismo de desgaste mais severo como o microtrincamento tenha sido favorecido, promovendo o maior arrancamento de material. As amostras de ASTM A-36 apresentaram maior perda de massa. Assim, é possível estabelecer

uma escala considerando a resistência à abrasão de cada material. Os resultados se mostraram coerentes e fornecem dados que podem levar a uma melhor seleção de materiais entre as soluções de proteção anti-desgaste na indústria.

PALAVRAS-CHAVE: Revestimento Duro; Desgaste Abrasivo; Abrasômetro de Tambor; Soluções Anti-desgaste; Aços de Alta Resistência à Abrasão.

ABSTRACT

The wear investigation is related to the core business of industries in several segments such as mining, cement, sugar and alcohol and steel. These industries require wear resistant materials, since the equipment must withstand extremely aggressive conditions. As solutions for the abrasive wear the use of welded hard coatings and high abrasion resistance plates are highlighted. The objective of this work was to evaluate and compare the abrasive wear resistance in a drum abrasometer two hardfacing alloys, one of the Fe-C-Cr system and the other of the Fe-C-Cr-B system, welded by the SMAW process and highly abrasion resistant steel plates with four degrees of hardness, 450, 500, 550 and 600 HBW. The methodology was divided into two parts, firstly, the materials characterization was sought through chemical, microstructural and hardness analysis. The second part consists of the wear resistance comparative analysis with a drum abrasometer through weight loss using iron ore as abrasive. Regarding the characterization, the four grades of Hardox® steel presented a martensitic structure on the surface, it is possible to verify a greater martensite refinement for greater hardness degrees of the steel. The microstructure of the welded alloys showed primary, carbides or borides, of types M_7C_3 and $M_{23}(C,B)_6$ involved in a matrix composed of a eutectic constituent. Comparatively, the Fe-C-Cr-B system alloy showed a microstructure refinement and a visibly greater number of carbides formed than Fe-C-Cr system. Hardfacing alloys showed higher surface hardness values and lower wear than Hardox® steels. This result was expected since welded alloys have carbides of high hardness involved by a matrix also resistant, which could have been the differential to provide a greater abrasion resistance. Among the Hardox® steels the wear reduction with the hardness increase was verified. The alloy with boron addition, despite having higher hardness values presented higher wear than the Fe-C-Cr alloy. It is possible that due to its greater hardness associated to the fact that a portion of abrasive wear by gouging (impact) occurs, a more severe wear mechanism such as micro-cracking has been favored, promoting the greater material detachment. The ASTM A-36 samples showed greater mass loss. Therefore, it is possible to establish a ranking taking into account the abrasion resistance of each material. The results have been consistent and provide data that can lead to a better materials selection among the wear protection solutions in the industry.

KEYWORDS: Hardfacing, Abrasive Wear, Drum Abrasometer, Wear Solutions, SMAW.

1. INTRODUÇÃO

A otimização dos processos produtivos é cada vez mais objeto de interesse dos diversos segmentos da indústria, impulsionada pela exigência de tornar as suas atividades economicamente viáveis e lucrativas. Para alcançar resultados expressivos tem-se observado o interesse crescente em fatores associados à redução de custos e aumento de produtividade mantendo-se a qualidade final do produto e atendendo às normas ambientais.

Destacam-se entre esses segmentos as indústrias de mineração, sucroalcooleira e de produção de aços. O desgaste representa um dos principais fatores de depreciação de capital e fontes de despesas com manutenção (LEITE, 2008). A mitigação do desgaste está relacionada ao *core business* dessas indústrias que necessitam fortemente de materiais resistentes ao desgaste para extração e processamento, uma vez que os equipamentos devem suportar condições particularmente agressivas que exigem resistência à abrasão, corrosão e resistência à erosão (MENDEZ et al, 2014).

Mendez et al (2014) cita que o custo estimado do desgaste para a indústria canadense é de US \$ 2,5 bilhões ao ano. Esse levantamento foi realizado pelo comitê da Associação de Tribologia ligado ao Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá. Citam também que nas operações de empresas petrolíferas ao norte de Alberta, no Canadá, os custos do tempo de inatividade em qualquer uma das linhas de produção são estimados em US\$ 3-6 milhões por dia, tendo sido este dado levantado por um estudo realizado na Universidade de Alberta em 2010. Esse estudo ainda relata que para uma empresa da área de petróleo, os custos com peças de reposição e mão de obra para manutenção envolvem mais de US \$ 40 milhões por ano.

Leite (2008) apresenta dados informados pela União da Agroindústria Açucareira do Estado de São Paulo – UNICA, que indicam que os custos do setor sucroalcooleiro com reposição e manutenção de equipamentos desgastados, no ano de 2005, giraram em torno de 5% do total da receita bruta.

Para fazer frente às exigências do mercado, máquinas são projetadas para trabalhar em condições extremas, como elevadas velocidades, altíssimas temperaturas, ambientes corrosivos e abrasivos, visando alta produtividade. Contudo, sob essas condições de trabalho, os componentes das máquinas estão expostos a um excessivo desgaste, podendo gerar elevados

gastos, com queda de rendimento da máquina, paradas não previstas, reposição de peças e etc. Enumeram-se quatro mecanismos pelos quais os componentes e equipamentos industriais podem perder sua utilidade: obsolescência, quebra, corrosão e desgaste. Este último assume papel relevante devido à sua complexidade e também à dificuldade de sua investigação (NOBLE, 1986).

Como soluções disponíveis no mercado e já bastante utilizadas nas indústrias para maximizar a confiabilidade de equipamentos e componentes em relação ao desgaste abrasivo, tem-se a utilização de revestimentos mais resistentes e o uso de chapas de elevada resistência à abrasão.

Para reduzir o desgaste em aplicações que envolvem abrasão, os materiais com alta dureza, como os carbonetos, geralmente levam vantagem sobre os metais. No entanto, os carbonetos puros apresentam um comportamento pior quando se trata de carregamentos de impacto, devido à sua baixa resistência à fratura, além do que os materiais ricos em carbonetos não são facilmente transformados, pelos métodos convencionais de manufatura, em componentes e peças com geometrias complexas (MENDEZ et al, 2014).

De acordo com Mendez et al (2014) uma das abordagens para combinar as propriedades de desgaste superiores de materiais cerâmicos com a capacidade de processamento dos metais é através de recobrimentos depositados por soldagem, que combinam a resistência à abrasão de carbonetos com a dureza de uma matriz metálica, todos depositados sobre o aço estrutural resistente. Essa técnica, chamada de revestimento duro, ou em inglês, *hardfacing*, também pode ser aplicada em placas metálicas protetoras, que posteriormente são fixadas nos equipamentos industriais, como pode ser observado na Figura 1.1.



FIGURA 1.1 - Placas de proteção com revestimento duro fixadas em equipamento para movimentação de minério de ferro.

FONTE: EUTECTIC-CASTOLIN, 2000.

A deposição de revestimentos duros pode ser feita através de diversas técnicas, levando em consideração o mecanismo de desgaste atuante e a espessura da camada de reforço. O *hardfacing* é normalmente executado com técnicas manuais, semi-automatizadas, mecanizadas, automatizadas ou ainda robotizadas associadas aos processos de soldagem. A soldagem se destaca pela sua versatilidade e pela grande variedade de ligas disponíveis. O revestimento é uma tecnologia que tem uma importância marcante no combate ao desgaste, seja na aplicação a peças novas, seja na recuperação de peças gastas em serviço.

Metais de adição contendo cromo e carbono (Fe-Cr-C) para a formação de carbonetos de cromo têm sido largamente utilizados na indústria. Em geral, as ligas de revestimento duro resistentes ao desgaste abrasivo pertencem ao sistema Fe-Cr-C, destacando-se em particular os aços de baixa liga, aços de alto cromo austeníticos e ferros fundidos de alto cromo (GREGOLIN, 1990). Borle et al (2015) justifica a utilização em larga escala do sistema Fe-C-Cr devido ao seu menor custo relativo em comparação com outros tipos de revestimentos como revestimentos a base de carbonetos de tungstênio ou ainda de polímeros.

No entanto, existem outros elementos que na forma de carbonetos, são capazes de apresentar propriedades de dureza e resistência à abrasão semelhante ou superior ao carboneto de cromo, nos quais se destacam o molibdênio, vanádio, nióbio, tungstênio, titânio, boro, entre outros (FAGUNDES JUNIOR, 2015). Dessa forma, fabricantes de consumíveis de soldagem adicionam elementos de ligas formadores de carbonetos complexos, para aumentar a resistência ao desgaste das ligas do sistema Fe-Cr-C para aplicações especiais (MENON, 1996). Contudo, alguns destes elementos, apesar de serem comprovadamente mais eficientes no aumento da resistência à abrasão do metal depositado, são mais dispendiosos, elevando consideravelmente o custo dos consumíveis (LEITE, 2008).

Segundo Leite (2008) a literatura com estudos e relatos dessas modificações e seus benefícios era quase inexistente dependendo do elemento adicionado. No entanto, vários artigos e estudos foram publicados a respeito dessas modificações e seus benefícios na última década. Destacam-se entre eles estudos relacionados à adição de boro ao sistema Fe-C-Cr.

Yüksel e Sahin (2014) relatam que boretos e carbonetos são as fases duras comuns em ligas de revestimento duro do sistema Fe-C-Cr-B. Os boretos que se formam com os metais de transição têm sido reconhecidos por possuírem alto potencial para aplicações extremas devido à sua alta dureza e excelente resistência ao desgaste, à fricção e à corrosão. Ainda segundo Yüksel e Sahin (2014) alguns estudos revelaram que o boro promoveu o

desenvolvimento de fases duras primárias, como boreto ou carboneto, e aumentou a fração volumétrica dessas fases duras resistentes ao desgaste. O estudo de Liu et al (2013) sugeriu que o boro influencia diretamente não apenas a formação de carbonetos, mas também na dureza da matriz, bem como na resistência ao desgaste das ligas. De acordo com Amushahi et al (2012) arames tubulares ricos em boro são amplamente utilizados em revestimentos duros de algumas aplicações industriais por métodos de pulverização ou soldagem.

O boro é interessante como um elemento de liga em ferros fundidos alto cromo. Ele é mais conhecido como um microaligante do aço, onde é aplicado em pequenas quantidades, de várias dezenas a várias centenas de parte por milhão. Nesses casos, seu papel é garantir a necessária temperabilidade da austenita. No entanto, uma vez que a aplicação de elementos formadores de carbonetos tornou-se popular na prática de investigação para melhorar as propriedades dos ferros fundidos brancos de alto cromo, tornou-se normal realizar experimentos com boro, tendo em conta suas propriedades, especialmente as estruturais e eletroquímicas (PETROVIC et al, 2002).

Outra solução anti-desgaste que têm alcançado elevada relevância na indústria é a utilização de chapas de alta resistência à abrasão. São materiais desenvolvidos pelas usinas siderúrgicas e ainda sem uma nomenclatura normatizada por entidade nacional ou internacional. Estes materiais apresentam elevada dureza na condição de fornecimento ao mercado, como laminados e temperados. Assim, sua aplicação na fabricação de equipamentos e componentes não requer operações subsequentes de endurecimento, sejam elas mecânicas, químicas, térmicas ou termoquímicas (VIEGAS, 2016). Estes aços desenvolvidos pelas usinas siderúrgicas são de boa soldabilidade, apresentando poucos elementos de liga em sua composição química ou em baixos percentuais, com carbono equivalente da ordem de 0,48 a 0,73, como no caso dos aços Hardox® produzidos pela SSAB (SSAB, 2014).

Frente a essas possíveis soluções anti-desgaste e suas aplicações nas indústrias de mineração, siderurgia, sucroalcooleira e de geração de energia, um estudo comparativo entre ligas do sistema Fe-C-Cr e Fe-C-Cr-B e entre aços Hardox® de alta resistência a abrasão com diferentes níveis de dureza, é muito relevante para verificação dos benefícios agregados a cada solução na resistência ao desgaste abrasivo. Os resultados deste estudo comparativo juntamente com a caracterização desses materiais levarão a uma melhor compreensão da atuação dos mecanismos de desgaste abrasivo, proporcionando uma melhor seleção entre as soluções de

proteção anti-desgaste e, conseqüentemente, maior vida útil dos equipamentos submetidos à fenômenos tribológicos, gerando redução dos custos dos produtos demandados pelo mercado.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar e comparar soluções adotadas na indústria em relação à resistência ao desgaste abrasivo em um abrasômetro de tambor. Dentre as soluções estudadas estão duas ligas comerciais de revestimento duro, soldadas pelo processo SMAW sobre um substrato de aço baixo carbono ASTM A-36, sendo a primeira denominada liga A do sistema Fe-C-Cr e a segunda denominada liga B do sistema Fe-C-Cr-B e chapas de alta resistência à abrasão com quatro graus de dureza fornecidos no mercado, sendo elas 450, 500, 550 e 600 HBW.

Para realizar essa avaliação foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Construir um dispositivo de ensaio de desgaste do tipo abrasômetro de tambor, semelhante ao proposto por Allebert et al (2015) e estabelecer um ranking entre os materiais através da perda de massa no ensaio;
- Caracterizar os materiais propostos como soluções resistentes ao desgaste abrasivo que foram selecionados para esse estudo, quanto à sua análise química, dureza superficial e microestrutura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste abrasivo

2.1.1 Definição

Gahr (1987), apresenta a definição de desgaste abrasivo como a ação de partículas duras, localizadas entre duas superfícies ou fixadas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo, provocando o deslocamento de material. O desgaste abrasivo também é caracterizado quando, ao invés de partículas, têm-se protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies em movimento. A Figura 2.1 mostra os tipos de desgaste abrasivo baseado no movimento das interfaces e das partículas abrasivas.

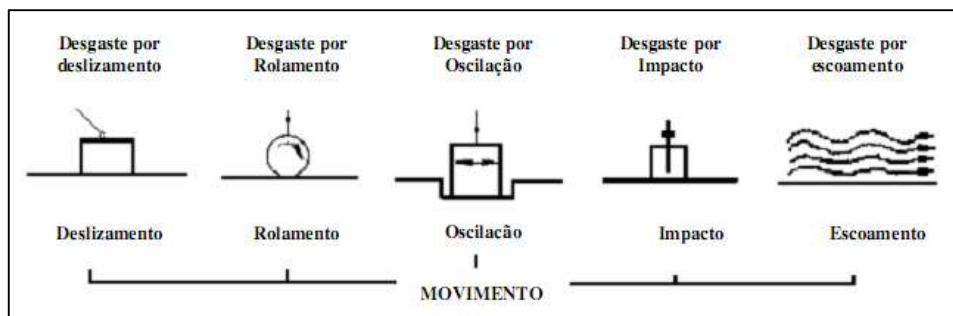


FIGURA 2.1 - Classificação dos processos de desgaste.

FONTE: GAHR, 1987.

A norma ASTM G65 (2016) cita a definição de desgaste abrasivo como o desgaste ocorrido quando partículas ou protuberâncias duras são forçadas contra ou se movem ao longo de uma superfície sólida. Segundo a mesma norma, esta definição cobre diferentes modos ou mecanismos de desgaste inseridos na categoria de desgaste abrasivo. Estes modos podem degradar uma superfície por riscamento, corte, deformação ou goivagem.

A norma DIN 50 320 (1979) define esse tipo de desgaste como a perda crescente de matéria de um corpo sólido, devido à ação mecânica, ou seja, por contato e movimento relativo de um contra-corpo, seja ele sólido, líquido ou gasoso.

Para Silva (2006) não existe um consenso na literatura a respeito da classificação dos tipos de abrasão. Blau (1997) define a abrasão a dois ou três corpos, onde na primeira a partícula abrasiva está fixada na superfície oposta a que sofre o desgaste. Já na segunda, abrasão a três corpos, as partículas abrasivas se movimentam livremente ou aprisionadas entre duas superfícies, podendo penetrar a outra superfície em diferentes ângulos. A Figura 2.2 mostra de forma representativa, os desgastes de dois e três corpos.

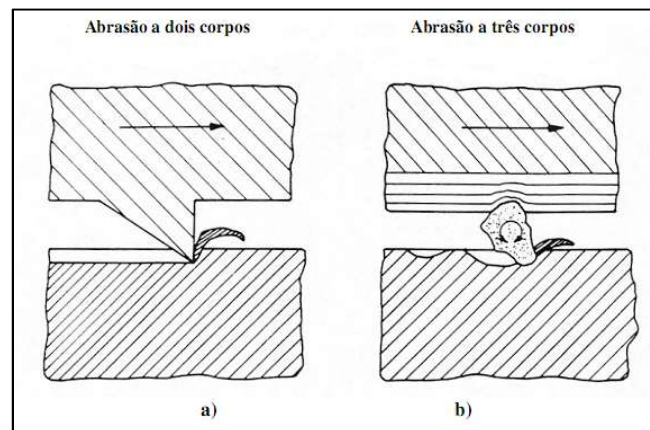


FIGURA 2.2 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos.

FONTE: GAHR, 1987

Ainda segundo Silva (2006) outros autores classificam os tipos de desgaste abrasivo de diversas formas. Uma classificação específica propõe os termos “desgaste abrasivo por deslizamento da partícula” (*grooving*) e “desgaste abrasivo por rolamento da partícula” (*rolling*). O *grooving* é caracterizado pelo desgaste ocorrer devido o contato de apenas uma região da partícula com a outra superfície ao longo de todo o processo. O *rolling* consiste justamente no rolamento da partícula ao longo do fenômeno de desgaste, trocando constantemente a região de contato com a superfície desgastada. Esse segundo processo pode gerar grandes deformações, múltiplas impressões e pouca direcionalidade.

Coelho (1985) classifica o desgaste abrasivo em três tipos:

a – Abrasão por Goivagem

Nesse tipo de desgaste abrasivo, grandes partículas são removidas de uma superfície pela ação de um abrasivo grosso que sob condições de impacto provoca cortes na superfície degradada, gerando grandes sulcos ou arranhões.

b – Abrasão sob Baixa Tensão

Para esse processo de desgaste, baixas tensões são envolvidas, como o próprio nome sugere. O deslizamento de partículas livres sobre uma superfície qualquer remove material pelo processo de microusinagem, sendo que abrasivos angulares produzem desgaste mais severo.

c – Abrasão sob Alta Tensão

Esse processo é caracterizado pela compressão exercida sobre o abrasivo quando este se desloca entre duas superfícies. Altas tensões são impostas sobre a superfície que sofre desgaste, onde as partículas do abrasivo não só pode penetrar na superfície, como também pode até provocar fraturas de fases mais frágeis da mesma. Esses mecanismos são exemplificados na Figura 2.3.

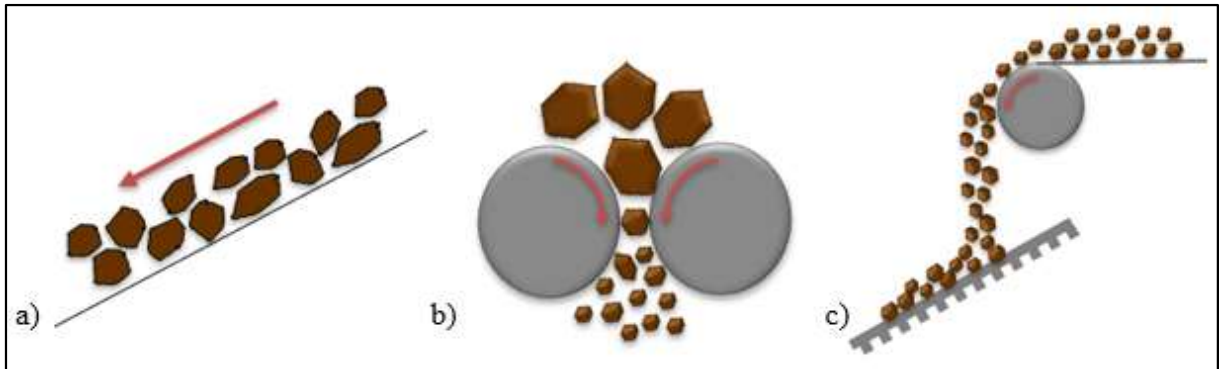


FIGURA 2.3 - Desenho esquemático da classificação do desgaste abrasivo: (a) abrasão a baixas tensões; (b) abrasão a altas tensões; (c) abrasão por goivagem.

FONTE: Adaptado de MISRA, 1970.

2.1.2 Importância do Desgaste Abrasivo

Segundo Leite (2008), estudos realizados nos Estados Unidos indicam uma perda econômica de 1% a 2,5% do PIB - Produto Interno Bruto devido ao desgaste. Segundo Gahr (1987) na Alemanha, uma pesquisa da década de 80 revela que desgaste e corrosão juntos contribuem com a perda de 4,5% do produto interno bruto. Com a crescente produção industrial nas últimas décadas, estima-se que o potencial de perdas econômicas devido ao desgaste tenha aumentado proporcionalmente nas indústrias. Estima-se que cerca de 2% a 4% do PIB de um país industrializado seja destinado ao reparo de peças e equipamentos sujeitos aos danos causados pelo desgaste.

Dowson (1979) relata que o primeiro estudo sobre impactos econômicos do desgaste foi realizado por Jost em 1966 em “Jost, H.P. Lubrication (Tribology) - A Report of the Present Position and Industry's Needs. Dep.of Education and Science, H.M. Stationary Office, London 1966” onde é apresentado o valor de 515 milhões de Libras em perdas econômicas totais estimadas na Inglaterra em 1966, correspondendo a 0,5% do PNB.

Segundo Eyre (1978) o desgaste pode ser definido como a degradação da superfície do componente ou do equipamento, geralmente envolvendo remoção progressiva do material, como resultados de processos tribológicos. Ainda segundo Eyre (1978) 50% das falhas de componentes de máquinas são provocados por desgaste abrasivo. O desgaste abrasivo se destaca como um dos principais causadores de falhas de componentes mecânicos na indústria.

2.1.3 Regime e Mecanismos de Desgaste Abrasivo

Conforme Silva (2006), o regime de desgaste abrasivo pode ser classificado em severo ou moderado e os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser formação de sulcos, formação de borda, corte, micro-fadiga e micro-trinca. Uma maneira mais comum de se definir o regime de desgaste é baseada na razão H_a/H , sendo H_a a dureza do abrasivo e H a dureza do material. A Figura 2.4 apresenta duas curvas de desgaste abrasivo em função da relação H_a/H , uma para materiais homogêneos e outra para materiais heterogêneos.

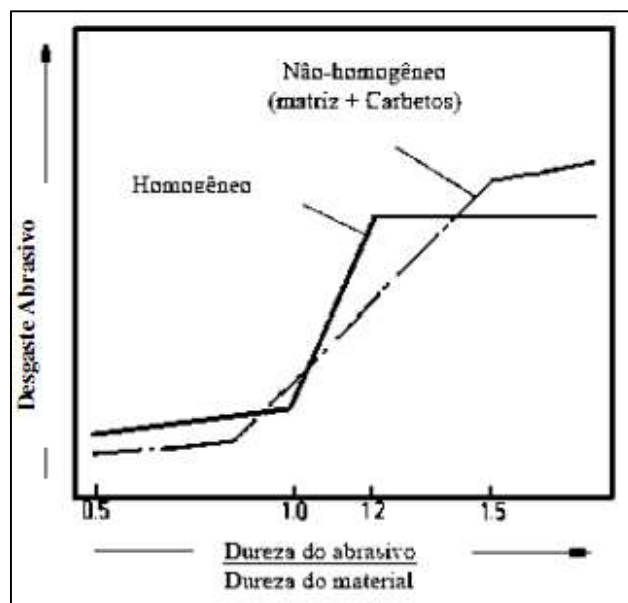


FIGURA 2.4 - Desgaste abrasivo em função da dureza da partícula abrasiva e do material.

FONTE: GAHR, 1987.

Para materiais homogêneos, tem-se que para valores de $H_a / H < 1$ o regime é definido como moderado e para valores de $H_a / H > 1,2$ o regime passa a ser considerado severo. Pode-se notar uma transição rápida de desgaste moderado para severo, quando a dureza do abrasivo supera a do material desgastado. Contudo, para materiais heterogêneos (com a presença de segundas fases) a região de transição é maior.

Para Pintaúde et al (2005) a severidade do desgaste depende de um conjunto de parâmetros que envolvem o tamanho e a angularidade da partícula abrasiva, assim como seu movimento na interface das superfícies, além da própria relação H_a / H . Para caracterizar um regime severo, segundo eles, é necessário não só uma relação H_a / H alta, mas sim uma combinação desses valores altos com evidências de corte na superfície degradada. Para baixos valores de H_a / H as taxas de desgaste são baixas mesmo com a presença de microtrincas. Dessa forma fica explícita a necessidade de também se analisar o mecanismo de desgaste que age sobre a superfície.

Os mecanismos de desgaste abrasivo citados anteriormente dificilmente provocam a abrasão total sofrida por uma superfície agindo separadamente, o que torna o desgaste abrasivo um tipo de desgaste complexo. Contudo, segundo Silva (2006) existe uma tendência à divisão da ação de certos mecanismos para materiais dúcteis e para materiais frágeis. Os materiais dúcteis estariam sujeitos aos mecanismos de formação de sulcos, formação de borda, corte e micro-fadiga e os materiais frágeis sujeitos ao mecanismo de microtrincamento.

No microssulcamento, o desgaste é caracterizado pelo deslocamento de material para os lados da ranhura devido a uma ação simultânea e sucessiva de muitas partículas abrasivas, ocorrendo a cargas mais baixas, não provocando uma retirada sensível de material. Pode ocorrer que em um caso de microssulcamento a quantidade de material deslocada para os lados é menor que a quantidade total de material deslocada da ranhura, formando um amassamento à frente da partícula abrasiva, denominado de proa. O microssulcamento está no regime de desgaste moderado, esses mecanismos são esquematizados na Figura 2.5.

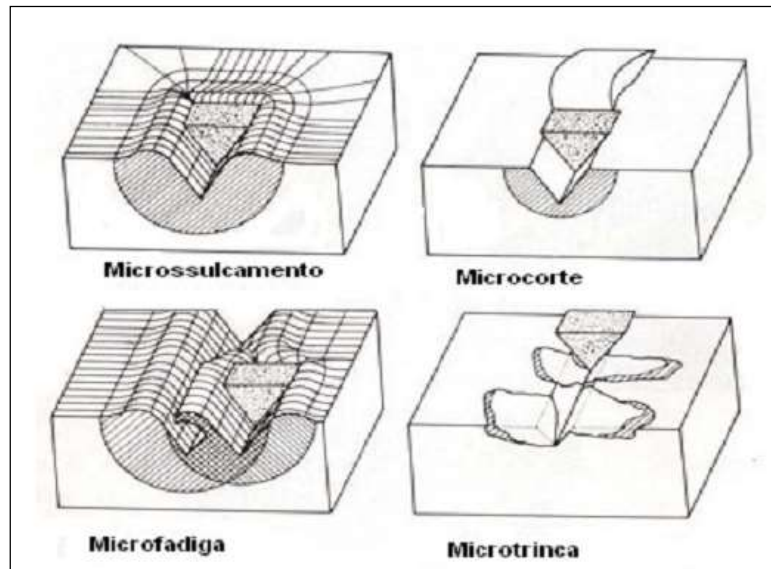


FIGURA 2.5 - Desenho esquemático dos micromecanismos de desgaste.

Fonte: GAHR, 1987.

A Figura 2.6 mostra alguns dos mecanismos de desgaste observados em microscopia eletrônica de varredura.

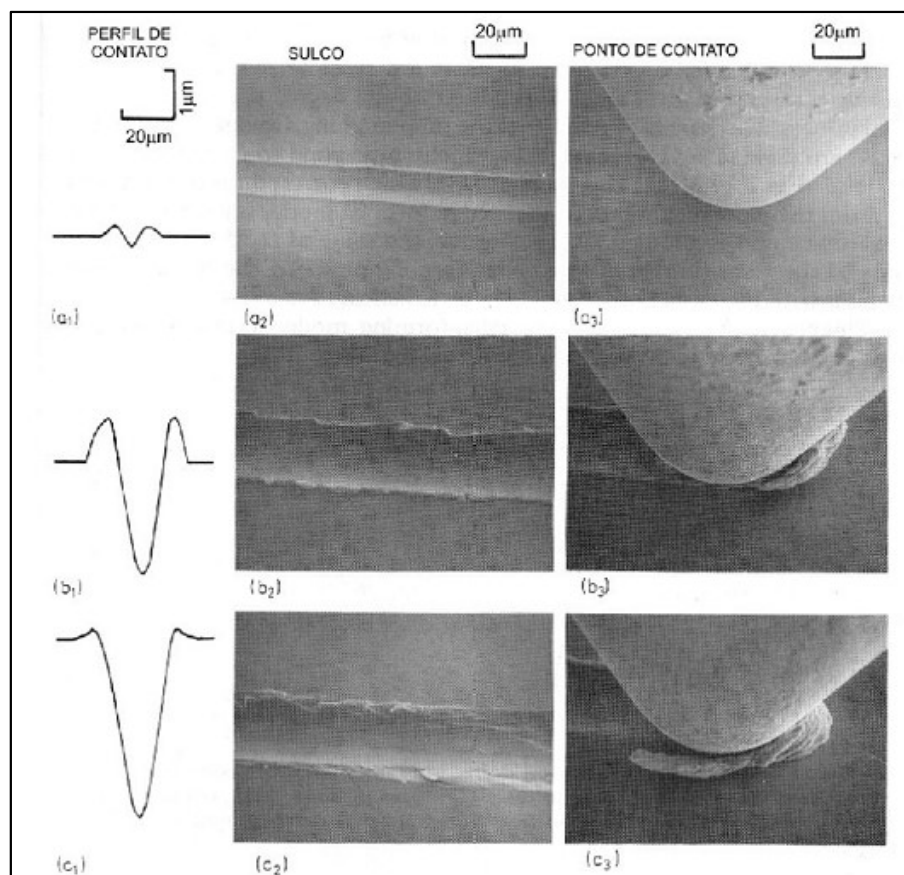


FIGURA 2.6 - Mecanismos de desgaste observados em microscopia eletrônica de varredura. (a) Microsulcamento; (b) Formação de borda; (c) Microcorte.

FONTE: MISRA, 1981.

Já o microcorte é um mecanismo que está no regime severo de desgaste, se tratando de materiais dúcteis, onde a perda de material é igual ao volume do desgaste produzido. A remoção de material se dá na forma de cavacos, provocados pela ponta do abrasivo, quando o ângulo de ataque das partículas de abrasivo é maior que um ângulo crítico, α_c . Segundo Leite (2008), α_c descreve uma severa transição entre microsulcamento e microcorte na teoria, contudo na prática, uma transição gradual de microsulcamento para microcorte é observada com o aumento do ângulo de ataque, conforme mostrado na Figura 2.7.

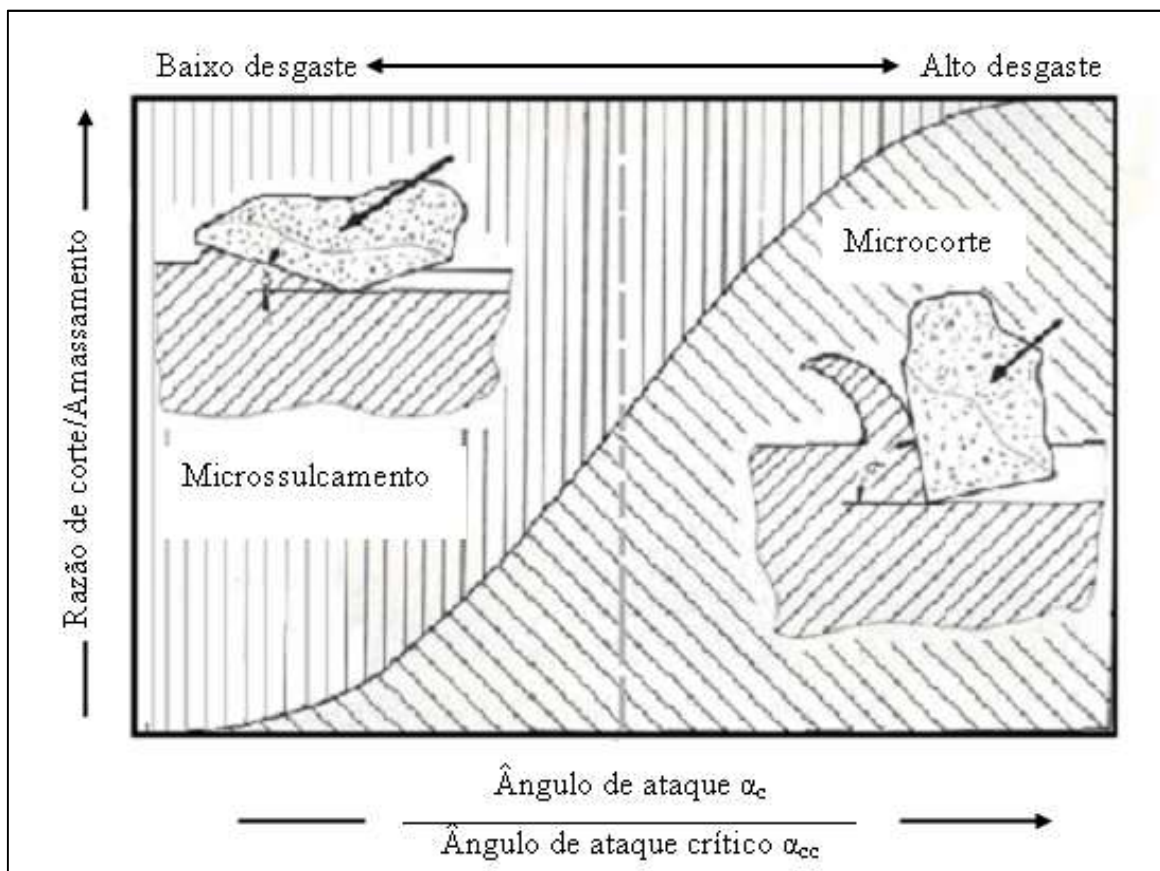


FIGURA 2.7 - Relação entre microsulcamento e microcorte em função da razão entre o ângulo de ataque e de ataque crítico.

FONTE: STROUD, 1962.

O microtrincamento que ocorre em materiais frágeis, como já foi citado, é determinado pela força que o grão abrasivo exerce sobre a superfície do material frágil. Quando essa força é maior que a tenacidade à fratura do material desgastado, ocorre a formação da microtrinca. O microlascamento ocorre em materiais frágeis devido à formação e propagação das microtrincas. Nestes casos, fragmentos de desgaste são destacados da superfície. De acordo

com Bowden e Tabor (1964), muitos materiais frágeis podem escoar plasticamente acima de um valor crítico que resulta em formação de trincas.

A taxa de abrasão é diretamente proporcional à distância de deslizamento e à carga sobre a partícula ou protuberância. Nos metais, a composição química e a microestrutura afetam diretamente a taxa de abrasão a baixas tensões segundo Misra (1970).

2.1.4 Desgaste abrasivo e efeito da microestrutura

Gahr (1987) apresenta um modelo simplificado a respeito da atuação da orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade de partículas de reforço em polímeros em relação à perda de massa diante de um desgaste abrasivo, mostrado na Figura 2.8. Segundo a literatura pode-se associar esse modelo ao efeito de uma segunda fase qualquer, como carbonetos, presente em uma matriz metálica.

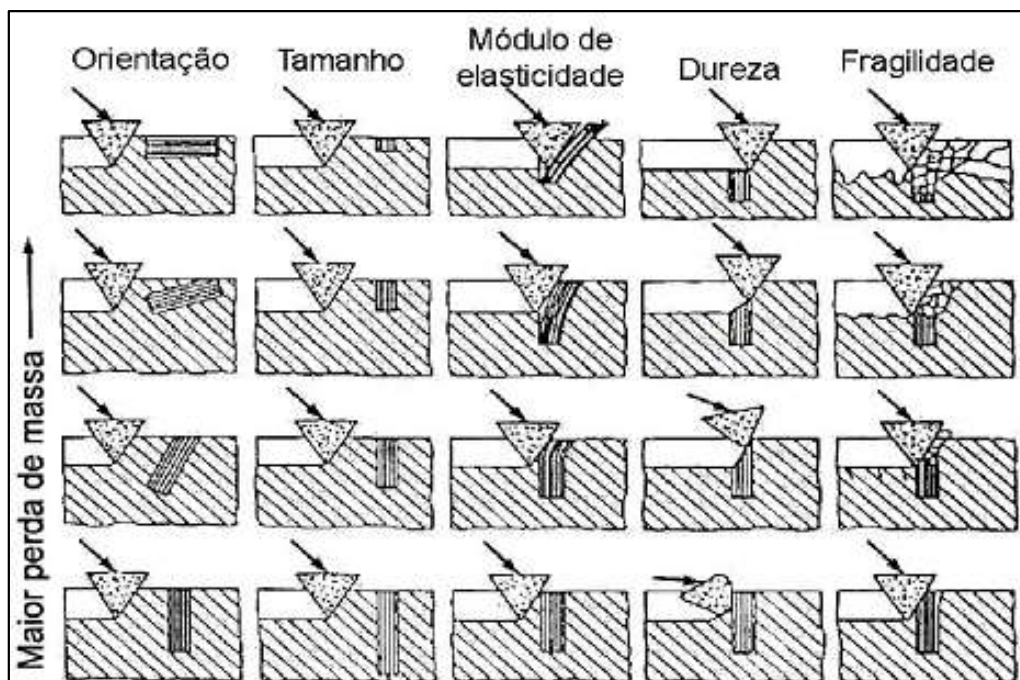


FIGURA 2.8 - Atuação da orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade da segunda fase no desgaste abrasivo.

FONTE: GAHR, 1987.

Segundo este modelo pode-se verificar que, caso o carboneto esteja paralelo à superfície, ele será muito mais facilmente removido do que se estivesse em uma posição

perpendicular à mesma. Outra característica do carboneto que propicia maior resistência ao desgaste abrasivo é o seu tamanho. Se o carboneto for menor que a profundidade atingida pela partícula abrasiva ele não trará benefícios que contribuam para uma maior resistência ao desgaste. Nesse modelo pode-se perceber também que, mesmo os carbonetos tendo um módulo de elasticidade alto, caso ele esteja em uma matriz com baixo módulo de elasticidade, esta tenderá a quebrar a ligação na interface matriz/carboneto e o carboneto será arrancado. Com relação à dureza do carboneto, caso esta seja maior que a dureza da matriz, o carboneto protegerá a matriz contra o desgaste. Já a fragilidade do carboneto, se esta for grande, ele tende a trincar e formar cavacos, que posteriormente podem atuar como partículas abrasivas.

Segundo Silva (2006), independentemente da liga, considerando abrasivos com dureza superior a dureza da matriz e inferior a dureza dos carbonetos, o aumento da fração volumétrica dos carbonetos promove o aumento da resistência ao desgaste. Além disso, é possível verificar que o aumento da relação T/D , onde T é definido como o tamanho do carboneto e D como a distância livre média entre carbonetos, pode também contribuir para o aumento da resistência ao desgaste abrasivo.

Contudo, esse aumento da resistência ao desgaste abrasivo também depende da deformação plástica da matriz. Considerando um caso em que a dureza do abrasivo é maior que a dureza da matriz e simultaneamente a ductilidade da matriz é limitada, o mecanismo de corte é favorecido, possibilitando uma seqüência de eventos, demonstrados na Figura 2.9, que conduzem ao microtrincamento dos carbonetos, devido a uma falta de suporte mecânico da matriz.

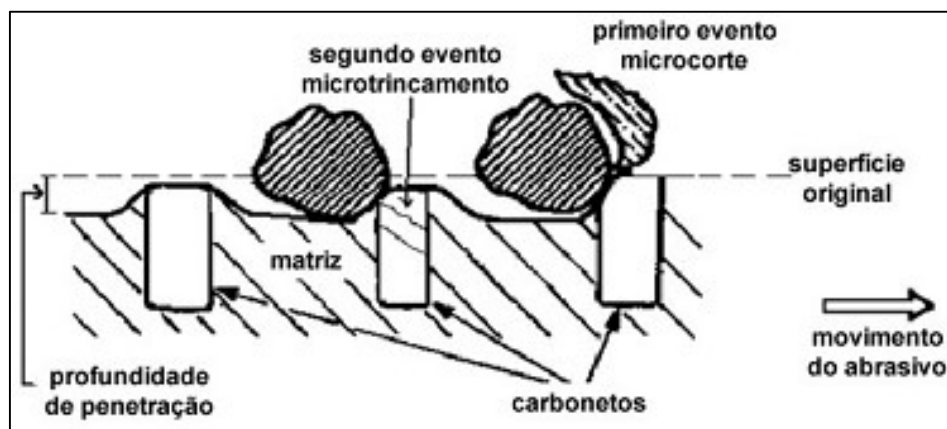


FIGURA 2.9 - Desenho esquemático da seqüência de eventos que resultam no microtrincamento dos carbonetos.

FONTE: SILVA, 2006.

2.2 Ensaio de desgaste abrasivo – abrasômetro de tambor

Esse ensaio foi desenvolvido com o objetivo de simular o desgaste que ocorre em caminhões betoneiras ou misturadores de concreto, visando investigar a resistência relativa ao desgaste para vários graus de aços (JUNGEDAL, 2012). Contudo, o mesmo se mostrou muito versátil no que diz respeito a simulação de condições de desgaste que ocorrem em mineradoras, pedreiras, cimenteiras, siderúrgicas e usinas de cana-de-açúcar, no que diz respeito ao escoamento e também ao transporte de matérias-primas em geral (ALLEBERT ET AL, 2015).

Ainda de acordo com Allebert et al (2015) métodos tipicamente utilizados para avaliação de desgaste, como pino sobre disco (ASTM G99) e roda de borracha (ASTM G65), onde um único tipo de material abrasivo é usado para testar diferentes tipos de materiais resistentes ao desgaste abrasivo, são insatisfatórios, uma vez que muitos tipos de minério consistem em uma combinação de minerais com propriedades diferentes, como a dureza e a resistência das bordas. Paralelamente existem testes para análise da abrasividade de minérios tais como o teste Cerchar (*ASTM D7625-10: Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*). Logo, um método que avalie o desgaste a partir da interação de abrasivos, como minérios, com uma variedade de materiais resistentes ao desgaste que auxilie na otimização de custos em materiais é de grande interesse de fabricantes de equipamentos e companhias que trabalham com manipulação de matérias-primas. O ensaio de abrasão em abrasômetro de tambor também se destaca em relação a outros ensaios laboratoriais pelo fato de se poder testar diversos materiais em um único ensaio, ou seja, de uma só vez, proporcionando condições de teste semelhantes para todas as amostras.

O ensaio de desgaste em tambor já é bastante difundido e estudado para uma condição em que a amostra de material a ser desgastado é fixada na parte central do tambor e submetida a um desgaste promovido pelo impacto do abrasivo na amostra. Hawk et al (1999) apresenta esse ensaio como *impeller-tumbler test* e consiste em um eixo central acionado por um motor que possui um porta amostra associado ao cubo na outra extremidade (*impeller*). Esse porta amostra gira rapidamente dentro de um tambor fechado contendo o abrasivo (*tumbler*) que também gira, porém com rotação bem menor. Dessa forma, o abrasivo é elevado dentro do tambor até o momento em que a força de atrito entre ele e o tambor é superada e o mesmo cai

sobre a(s) amostra(s) promovendo o desgaste por abrasão e impacto. Esse ensaio é exemplificado na Figura 2.10.

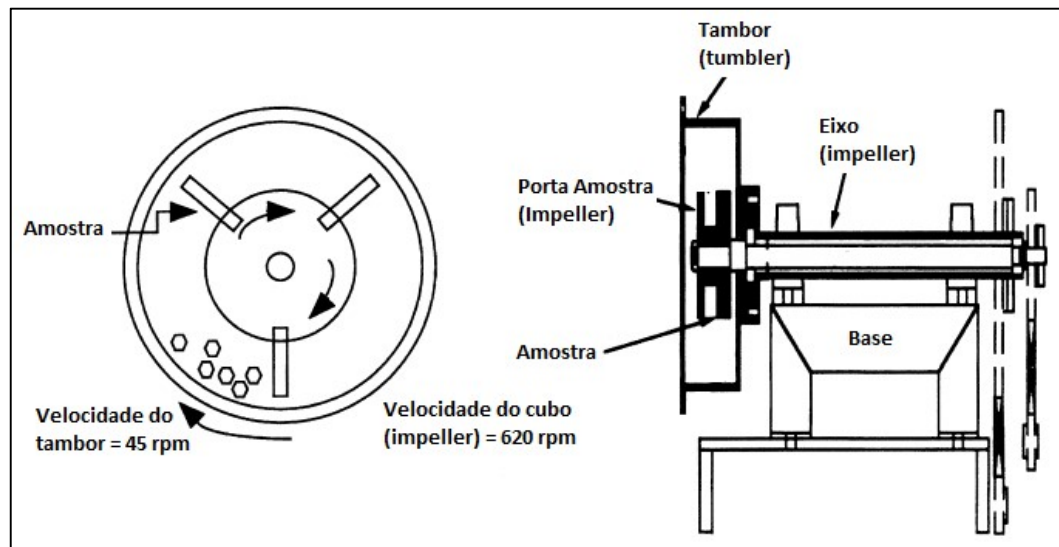


FIGURA 2.10 - Desenho esquemático do ensaio de desgaste de tambor do tipo Impeller-tumbler.

FONTE: Adaptado de HAWK ET AL, 1999.

No ensaio de desgaste de tambor realizado nesse estudo as amostras a serem ensaiadas são posicionadas com a utilização de porta amostras parafusados ao longo do perímetro do tambor enquanto o abrasivo com granulometria controlada é colocado no interior do mesmo, como descrito por Allebert et al (2015) e apresentado na Figura 2.11. O tambor é fechado e colocado para girar com velocidade controlada promovendo o desgaste das amostras. A resistência ao desgaste abrasivo é verificada através da pesagem das amostras antes e depois do ensaio, ou seja, através da perda de massa das amostras ao longo do ensaio. Dessa forma, materiais que possuem maior resistência ao desgaste abrasivo perderão menos massa. O objetivo principal desse teste é fornecer dados que reproduzirão um “*ranking*” de materiais quanto a sua resistência a abrasão sob condições específicas, revelando se um material é mais resistente que um outro nas condições fixadas, por isso ele é utilizado em estudos comparativos.

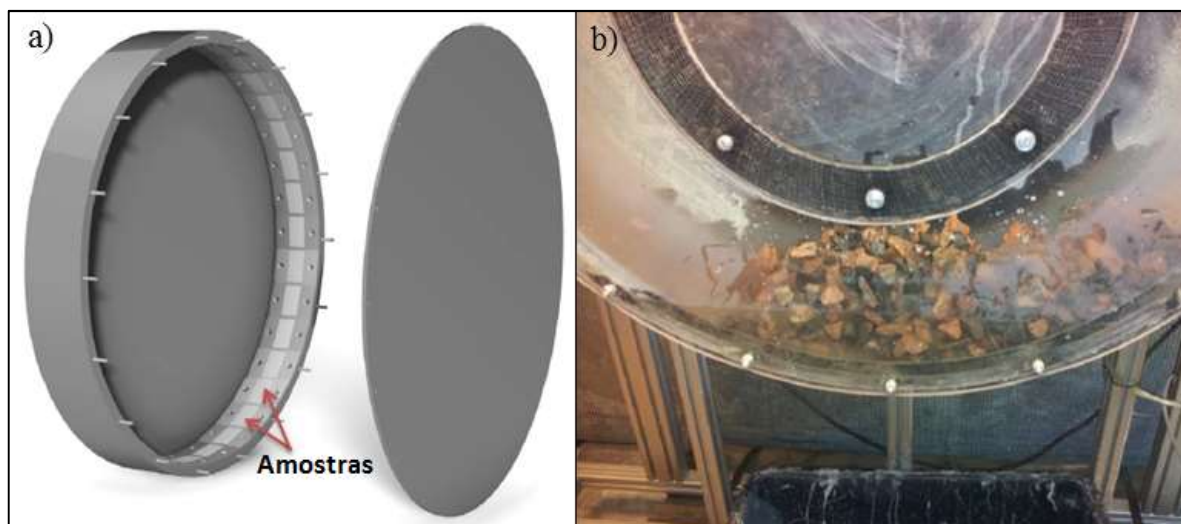


FIGURA 2.11 - a) Posição das amostras no tambor. b) Abrasivo no interior do tambor.
 FONTE: a) ALLEBERT ET AL, 2015. b) JUNGEDAL, 2012.

Como o ensaio ainda não é normatizado, os parâmetros de teste podem ser ajustados para atender a simulação de condições variadas. Entre as variáveis que devem ser definidas no ensaio estão, o tempo total de duração do ensaio, o intervalo de tempo entre trocas da carga de abrasivo, a carga do abrasivo, o tipo de abrasivo e sua granulometria, a velocidade de rotação do tambor em rotações por minuto, ensaio a seco ou úmido e a proporção de água em relação a carga abrasiva para ensaios úmidos.

Tempo total de teste (T_{tt}) – O tempo total de teste é normalmente longo uma vez que as condições de teste não são aceleradas. Allebert et al (2015) fizeram testes com 92 e 70 horas de duração. De forma grosseira, quanto maior o tempo total de teste maior será o número de interações entre as partículas abrasivas e as amostras.

Intervalo de tempo entre trocas da carga de abrasivo (I_{ta}) – O intervalo entre trocas é um parâmetro importante nesse ensaio uma vez que a cada troca se renova o poder de abrasão das partículas abrasivas. Como visto na seção anterior, a forma da partícula abrasiva, ou melhor, o ângulo de ataque α_c das bordas das partículas de abrasivo, interferem no tipo de dano a superfície. Uma aresta mais afiada fará uma pressão maior sobre a superfície do que arredondada, devido a sua menor área de contato. No entanto, as arestas afiadas são mais sensíveis ao esmagamento do que as arredondadas. Allebert et al (2015) fez testes com diferentes tempos de trocas da carga de abrasivo, sendo elas 23 horas e combinações de 7 e 16 horas. O múltiplo uso do abrasivo pode afetar os resultados dos testes e não é recomendado.

Carga do abrasivo (C_a) - O peso da carga de abrasivo utilizada no ensaio é um parâmetro que pode ser variado para simulação de diferentes condições de operação. Allebert et al (2015) utilizou diferentes cargas de abrasivo em seus testes. Contudo, devido ao tipo de montagem da parte frontal do tambor com a utilização de escotilha, a quantidade de abrasivo máxima é limitada pela abertura da escotilha. Um padrão que pode ser utilizado como referência relatado por Jungedal (2012) é que um quarto do perímetro do tambor, ou seja, um quarto das amostras dentro do tambor tenham contato direto com o abrasivo.

Tipo de abrasivo (A_t) e granulometria (A_{Gr}) – A possibilidade de variação do tipo de abrasivo a ser utilizado no ensaio é um dos fatores que proporcionam grande versatilidade ao ensaio. Segundo Jungedal (2012) a mineralogia das partículas abrasivas também é importante, uma vez que estas geralmente contêm uma combinação de minerais que afeta a degradação e a capacidade do abrasivo de penetrar na superfície, ou seja, o dano causado à superfície. A composição do abrasivo dará uma indicação da abrasividade A_i . Bond (1963) apresenta a Tabela 2.1 com uma classificação de abrasividade realizada a partir de ensaio de abrasão de tambor impeller-tumbler medindo a perda de peso para um aço específico com dureza Brinell de 500 HBW.

TABELA 2.1 - Abrasividade de alguns minerais.

Material	A_i [g/h]
Dolomita	0,0160
Calcário	0,0320
Clínquer (cimento)	0,0713
Magnesita	0,0783
Sulfetos pesados	0,1284
Minério de cobre	0,1647
Hematita	0,2217
Magnetita	0,2217
Cascalho	0,2879
Granito	0,3880
Taconita	0,6237
Quartzo	0,7751
Alumina	0,8911

FONTE: Adaptado de BOND, 1963.

É mostrada na Tabela 2.1 a abrasividade do quartzo e da hematita, principais componentes do minério de ferro, que é o abrasivo utilizado nesse estudo.

Velocidade de rotação (V_R) – No equipamento projetado e apresentado por Allebert et al (2015) o tambor de aço de 800mm de diâmetro foi alimentado por um motor de 0,25kW, com uma velocidade máxima de 50 rotações por minuto. O motor também foi conectado a um inversor de frequência para permitir o ajuste da rotação. Dessa forma a rotação do tambor controla o valor da velocidade tangencial nas partes mais externas do tambor, ou seja ao longo do perímetro, onde as amostras são fixadas. No equipamento construído por Jungedal (2012), para a rotação de 48rpm, a velocidade tangencial máxima de 2,01m/s é alcançada.

A seleção da velocidade de rotação do tambor é importante porque ela define também a dinâmica do abrasivo no interior do tambor. Para velocidades de rotação muito baixas o abrasivo tem um comportamento aparente de estar estático. Na verdade o que ocorre é que a força de atrito entre o tambor e o abrasivo é facilmente vencida pela componente da força peso na direção tangencial ao tambor. Para maiores velocidades de rotação maior é a força normal do abrasivo sobre o tambor aumentando a força de atrito e conseqüentemente arrastando o abrasivo para regiões mais altas do tambor. Pode-se regular a velocidade do tambor para que o abrasivo chegue até uma altura determinada do tambor. Jungedal (2012) apresenta a possibilidade de instalação de elevadores dentro do tambor para realizar um ensaio de impacto. Esse recurso não será aplicado no presente estudo, contudo essa opção não é de difícil implementação, podendo ser aplicada em trabalhos futuros.

Ensaio úmido ou a seco – A montagem do equipamento, com as devidas vedações, permite a realização do ensaio de desgaste de tambor com a adição de água numa dada proporção em relação a quantidade de abrasivo. Jungedal (2012) buscando simular o desgaste em caminhões betoneiras de concreto optou por fazer testes úmidos. Foram feitos testes com diferentes proporções de água e abrasivo com verificação da variação do pH da mistura ao longo dos ensaios, com o objetivo de investigar a taxa de corrosão ao longo do ensaio.

Em resumo, o ensaio envolve a abrasão de várias amostras de dimensões padronizadas com um abrasivo de granulometria e composição controlada. O abrasivo é alimentado no tambor, que em seguida é colocado para girar em uma rotação pré-determinada. As amostras são limpas e pesadas antes e depois do ensaio e a perda de massa é calculada.

2.3 Engenharia de Superfícies – técnicas de proteção

O desgaste de peças, componentes e equipamentos pode ser inevitável em muitos casos, contudo técnicas de proteção contra o desgaste foram sendo criadas e estudadas ao longo dos anos pela área de engenharia de superfícies. Segundo Hutchings (1992) existem basicamente dois objetivos comuns no uso da engenharia de superfície para aplicações tribológicas: aumentar a resistência ao desgaste de uma superfície e modificar o seu comportamento quando em atrito. Em alguns casos ambos são alcançados utilizando uma mesma técnica de proteção contra o desgaste. A Figura 2.12 apresenta os métodos utilizados em engenharia de superfície.

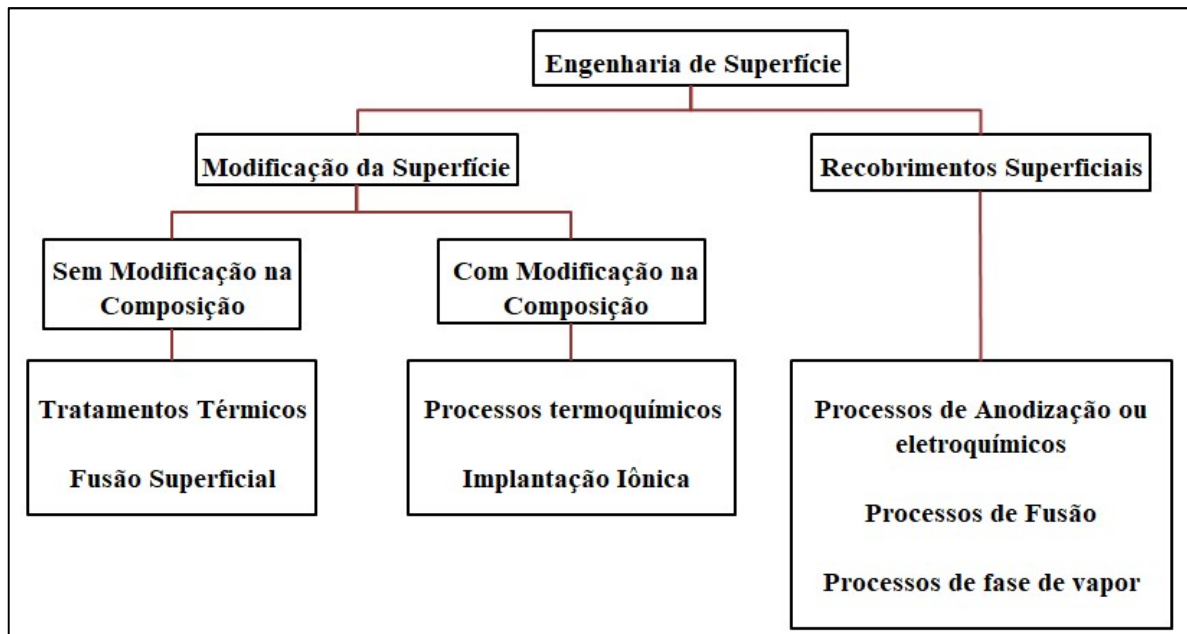


FIGURA 2.12 - Técnicas de Proteção estudadas pela Engenharia de Superfície.

FONTE: Adaptado de HUTCHINGS (1992).

Ainda segundo Hutchings (1992) alguns métodos podem modificar seletivamente a microestrutura da superfície do material sem alterar sua composição, como nos casos de tratamentos térmicos. Alternativamente, ambas a composição e a microestrutura podem ser modificadas juntas, através de um tratamento termodinâmico por difusão de um elemento químico diferente na superfície. As mudanças na composição química e na microestrutura que podem ser alcançadas com esses métodos são inevitavelmente limitadas e por muitos motivos recobrimentos de materiais completamente diferentes podem ser aplicados, como por exemplo, nos casos de revestimentos aplicados por soldagem ou aspersão térmica. Leite (2008) apresenta

na Figura 2.13 uma classificação adaptada de Henderson (1991) dos processos de revestimento especificamente. Fica evidente o grande número de técnicas ou processos que podem ser utilizados para aplicação de recobrimentos.

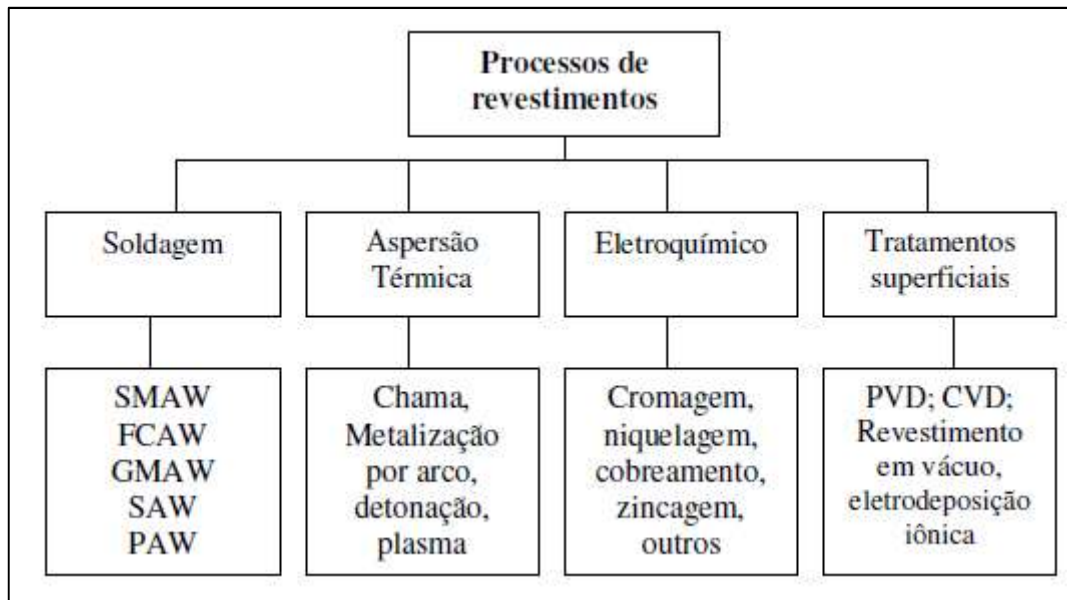


FIGURA 2.13 - Classificação detalhada dos processos de recobrimento.

FONTE: HENDERSON (1991).

A AWS (2011) apresenta no *Welding Handbook* que revestimento superficial ou *surfacing* em inglês, é um processo de fabricação industrial definido como a aplicação de uma ou mais camadas de metal a uma superfície por soldagem, brasagem ou aspersão térmica para obter propriedades ou dimensões desejadas. Variações desse processo são categorizadas como *cladding*, *hardfacing*, *buildup* e *buttering* e são definidas pelo *Welding Handbook* como descrito a seguir.

O *cladding* é uma variação do processo de revestimento, cujo objetivo é depositar ou aplicar um revestimento a um substrato, normalmente para melhorar a resistência à corrosão ou ao calor. O revestimento normalmente é composto de uma camada espessa aplicada sobre um aço carbono baixa liga com o objetivo de se obter uma superfície resistente a corrosão. Como regra, a resistência mecânica do revestimento não é considerada na concepção de projeto da peça ou componente a ser revestido.

Já no chamado *buildup* o revestimento é depositado para se alcançar as dimensões requeridas para o componente. Muito usado na recuperação dimensional de peças. Nesse caso, a resistência mecânica do metal de solda aplicado deve ser considerada no projeto.

O *buttering*, também chamado na indústria de amanteigamento ou camada de almofada, é uma variação de revestimento utilizado para depositar metal de solda em uma ou mais superfícies para promover compatibilidade do metal de solda para uma subsequente soldagem complementar. O *buttering* difere do *buildup* por ser utilizado por razões metalúrgicas e não devido a controle dimensional.

O *hardfacing*, ou “revestimento duro” é também uma variação do processo de revestimento, no entanto o material é depositado na superfície (substrato) para reduzir o desgaste seja pelo aumento da resistência da superfície à abrasão, ao impacto, à erosão, ao deslizamento, ou à cavitação. Como no *cladding*, a resistência mecânica do revestimento duro não é levada em consideração durante o projeto do componente.

Henderson (1991) define revestimento duro como a aplicação de um material duro e resistente ao desgaste na superfície de um componente através de soldagem, metalização ou associação de processos de soldagem para reduzir a perda de material por abrasão, impacto, erosão, deslizamento superficial e cavitação. De acordo com AWS (2011) o *Hardfacing* é executado normalmente com técnicas manuais, semi-automatizadas, mecanizadas, automatizadas ou ainda robotizadas associadas aos processos de soldagem como SMAW, GMAW, SAW e FCAW (com proteção gasosa ou auto protegido) e processos de aspersão térmica, tais como ASP, PSP e HVOF.

Tem-se como vantagens da aplicação de revestimentos duros os seguintes fatores:

- ✓ Resistências adicionais ao desgaste ou à corrosão podem ser aplicados exatamente onde são necessários;
- ✓ O *hardfacing* pode ser facilmente adaptado para as aplicações de campo;
- ✓ O *hardfacing* facilita o uso econômico de ligas muito caras e contribui com a redução de custos com materiais avançados;
- ✓ O revestimento duro resistente ao desgaste é suportado por um substrato resistente que suporta as cargas aplicadas. (AWS, 2011).

Em qualquer aplicação específica a liga metálica a ser depositada como revestimento duro somente deve ser selecionada após uma cuidadosa análise das causas que provocam o desgaste. Geralmente existe uma correlação grosseira entre dureza e resistência à

abrasão, contudo nem dureza e nem teor de liga (por vezes utilizada erroneamente como critério de seleção) são indicadores confiáveis de resistência à abrasão. A melhor abordagem para a seleção do revestimento a ser utilizado é identificar certos fatores prioritários e então comparar as várias ligas de revestimento com base na resposta a esses fatores sob condições cuidadosamente controladas. Os fatores a serem identificados incluem os seguintes:

1. O tipo e as características do elemento abrasivo (dureza, forma, tamanho de partícula e tenacidade);
2. A quantidade de impacto envolvido na aplicação;
3. O suporte prestado ao depósito pelo substrato;
4. Os níveis de carregamento envolvidos;
5. A natureza do carregamento (tensão, compressão ou cisalhamento);
6. A temperatura de funcionamento;
7. Condições ambientais significativas.

Os dados utilizados para a avaliação, seja a partir do desempenho em serviço ou através de testes laboratoriais, devem ser criticamente analisados. Os próprios testes devem fornecer resultados reproduzíveis que se correlacionam com o desempenho em serviço.

3. METODOLOGIA

O trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência ao desgaste de seis tipos diferentes de materiais já empregados na indústria. O ensaio escolhido para o estudo utiliza um equipamento denominado “abrasômetro de tambor”, desenvolvido no decorrer deste trabalho. Para melhor entendimento a metodologia será dividida em três partes, a primeira aborda a concepção, projeto e fabricação do equipamento assim como os parâmetros de ensaios utilizados nos testes.

Na segunda parte do capítulo discute-se a preparação dos corpos de prova, alguns obtidos por soldagem e outros por laminação, são apresentados os parâmetros de soldagem empregados, bem como as ligas e materiais envolvidos na fabricação das amostras, também será discutido a seleção e preparação do abrasivo empregado no principal ensaio do trabalho, o de perda de massa, alcançando por fim um resultado comparativo para cada tipo de material.

Por fim são apresentados os ensaios utilizados para caracterização dos aços, dos revestimentos e do abrasivo, assim como a metodologia para alcançar o resultado da perda de massa comparativa. Os testes empregados são: DRX, análise microestrutural, ensaio de dureza e pesagem das amostras.

3.1 Abrasômetro de Tambor (construção)

A metodologia adotada no ensaio de desgaste abrasivo desenvolvido nesse trabalho propõe-se a submeter os materiais em estudo à condições de desgaste típicas esperadas no escoamento de matérias-primas em minas, cimenteiras ou pedreiras. O método visa então obter um resultado mais próximo do real na seleção de materiais em relação ao desgaste pois nele a escolha do abrasivo que será utilizado no ensaio pode ser exatamente o mesmo – ou bem semelhante - do encontrado em serviço, simulando assim esforços e interações mais reais com as quais o material encontrará em operação.

Com esse objetivo, foi utilizado o equipamento abrasômetro de tambor, no qual corpos de provas são fixados ao longo do perímetro interno de um tambor e são expostos ao abrasivo selecionado, também colocado no interior do tambor. O tambor gira a uma dada

rotação e por um tempo determinado, promovendo o desgaste das superfícies dos corpos de prova. Para que o poder abrasivo seja mantido, a carga de material abrasivo é trocada de tempos em tempos. O principal resultado é em relação à resistência ao desgaste dos corpos de prova e essa é determinada pela perda de massa de cada amostra, através da pesagem antes e após a realização do ensaio.

O equipamento nomeado como “Abrasômetro de Tambor”, utilizado para o estudo foi projetado e construído no LRSS – Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação do DEMEC – UFMG e é apresentado na Figura 3.1. Ele foi desenvolvido a partir de uma adaptação do modelo de equipamento proposto e construído por Allebert et al (2015), uma vez que trata-se de um conceito de equipamento elaborado recentemente e que não possui ainda padronização determinada por norma.



FIGURA 3.1 - Abrasômetro de tambor construído no LRSS.

Allebert et al (2015) desenvolveu seu equipamento com 34 posições para amostras, já o equipamento desenvolvido no LRSS possui 20 posições. O número menor foi determinado para adequar o projeto do equipamento a necessidade de número de amostras desse estudo.

O equipamento usado no ensaio de desgaste consiste em um tambor que é acionado por um conjunto moto-redutor. Foi utilizado um motor trifásico de 0,5 CV e rotação de 1720 rpm acionado por um inversor de frequência, capaz de modificar essa rotação.

O tambor é constituído de uma seção de tubo de 100mm de largura e diâmetro de 508mm que é fechada em suas laterais para contenção dos porta amostras e do abrasivo.

Na parte frontal do tambor foram utilizadas duas chapas de policarbonato de 2mm de espessura cada, para que fosse possível a visualização do movimento do abrasivo na parte interna do tambor ao longo do ensaio. A chapa externa, de diâmetro menor, foi projetada como escotilha, para permitir o acesso à parte interna do tambor. Esse acesso é importante para que o abrasivo possa ser depositado no interior do tambor após o posicionamento das amostras.

Ao motor foi acoplado um redutor de velocidade com razão de 1:35 que em conjunto com o inversor de frequência possibilitou alcançar uma rotação de 45rpm para o tambor.

Para que todas as amostras possuíssem a mesma área, eliminando então essa variável no teste, foram confeccionados 20 porta amostras fabricados em material de alta resistência ao desgaste abrasivo, Hardox[®] 500, com uma abertura definida para a entrada dos corpos de prova.

O porta amostra possui quatro furos roscados, sendo dois na face posterior usados para sua fixação à parte interna do tambor e outros dois para travamento do corpo de prova no rasgo interno do porta amostra, como mostrado na Figura 3.2.

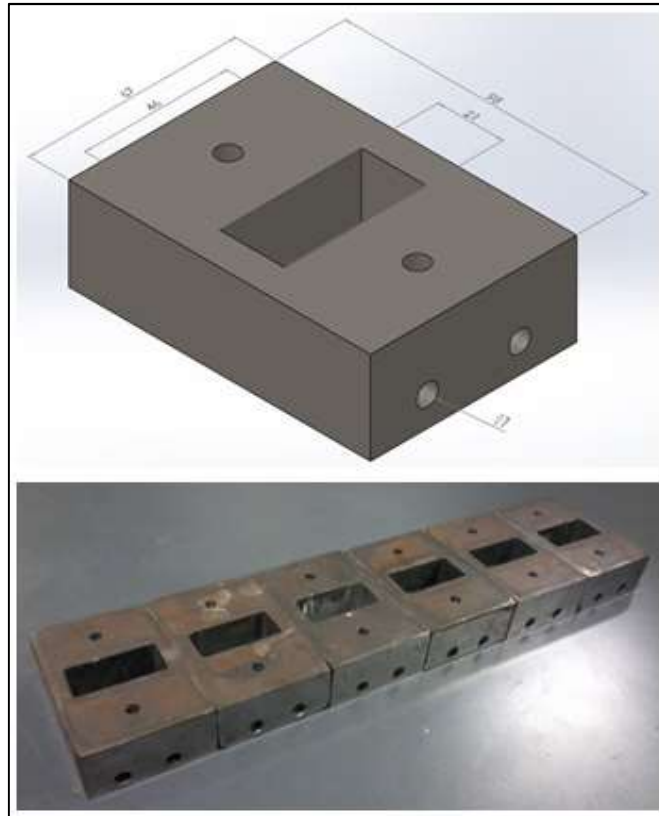


FIGURA 3.2 - a) Projeto do porta amostra.b) Porta amostras fabricados.

Todos os porta amostras foram introduzidos e fixados no tambor, com posições fixas e aberturas em seu centro onde posteriormente são fixados os corpos de prova. Um esquema do tambor com os porta amostras fixados é apresentado na Figura 3.3.

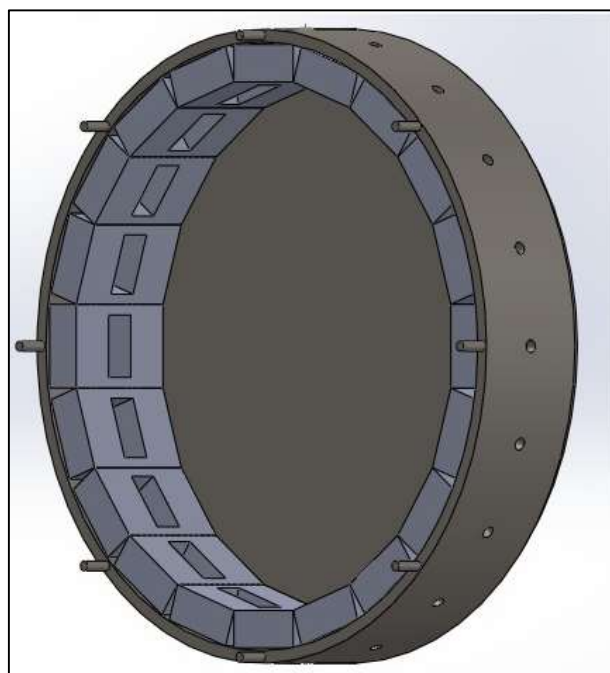


FIGURA 3.3 - Esquema do tambor com porta amostras fixados.

3.2 Ensaio de Desgaste

Velocidade de rotação do ensaio (V_R)

A velocidade de rotação de 45rpm foi definida como a velocidade de rotação do ensaio (V_R) porque nessa velocidade o abrasivo não apresenta o comportamento aparentemente estático descrito na revisão bibliográfica e também não promove o deslocamento do abrasivo para alturas muito elevadas dentro do tambor o que poderia ocasionar uma maior parcela de desgaste por impacto. Essa velocidade de rotação foi aferida com um tacômetro da marca INSTRUTHERM, modelo TD-812 e a frequência marcada pelo inversor de frequência foi determinada em 60,3Hz, como mostrado na Figura 3.4. Essa frequência foi mantida durante todo o ensaio.



FIGURA 3.4 - Tacômetro usado na aferição da rotação do tambor e frequência correspondente.

Tempo total do teste (T_{tt})

O tempo total do teste (T_{tt}) foi de 90 horas divididas em cinco dias, sendo que a cada dia o sistema operou por 18 horas ininterruptas e ao fim das 18 horas era imposta uma parada ao sistema para efetuar a troca do abrasivo, caracterizando assim o intervalo de tempo entre trocas da carga de abrasivo (I_{ta}). Dividindo-se o tempo total de teste (T_{tt}) pelo intervalo de tempo entre trocas de abrasivo (I_{ta}) tem-se o número de cargas de abrasivo utilizadas ao longo de todo o teste.

Tipo de abrasivo (A_t)

Para a execução do ensaio de desgaste nesse estudo foi selecionado como tipo de abrasivo (A_t) o minério de ferro, devido à sua relevância como matéria prima estando presente na maior parte das mineradoras do estado de Minas Gerais e do país. O minério de ferro usado nesse ensaio foi caracterizado quimicamente e fisicamente, através da análise de difração de raios x e da análise granulométrica.

Para seleção das partículas do abrasivo utilizado no ensaio de desgaste abrasivo de tambor, foi feita a análise granulométrica de toda a carga de minério de ferro. Foram utilizadas peneiras com aberturas de malha de 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm. O material retido foi pesado para cada uma das malhas em balança da marca TOLEDO DO BRASIL, modelo 9094C/6. É apresentado na Figura 3.5 a curva granulométrica da carga do abrasivo. A granulometria do abrasivo (A_{Gr}) foi definida e foi selecionado para ser utilizado no ensaio de desgaste abrasivo de tambor apenas o minério de ferro que ficou retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, até o passante na peneira com abertura de malha de 19,0 mm, ou seja, porções de minério com dimensões entre 4,75mm e 19,00mm, exemplos do minério utilizado são apresentados na Figura 3.6.

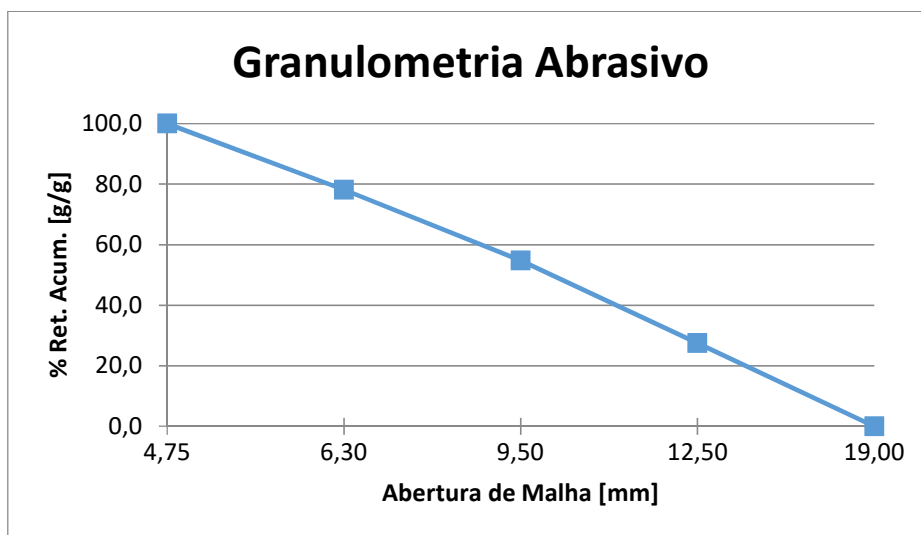


FIGURA 3.5 - Curva granulométrica da carga de minério de ferro.



FIGURA 3.6 - Amostra de minério de ferro com granulometria selecionada entre 4,75mm e 19,00mm.

Uma amostra da carga de minério de ferro foi coletada antes de ser utilizada no ensaio de desgaste abrasivo de tambor e foi moída por 10 segundos utilizando moinho pulverizador de panela mostrado na Figura 3.7. Posteriormente foi submetida à análise semi quantitativa por Difractometria de Raios-X para levantamento das fases presentes. O difratograma obtido é apresentado na Figura 3.8.



FIGURA 3.7 - Amostra de minério de ferro pulverizada para análise por DRX.

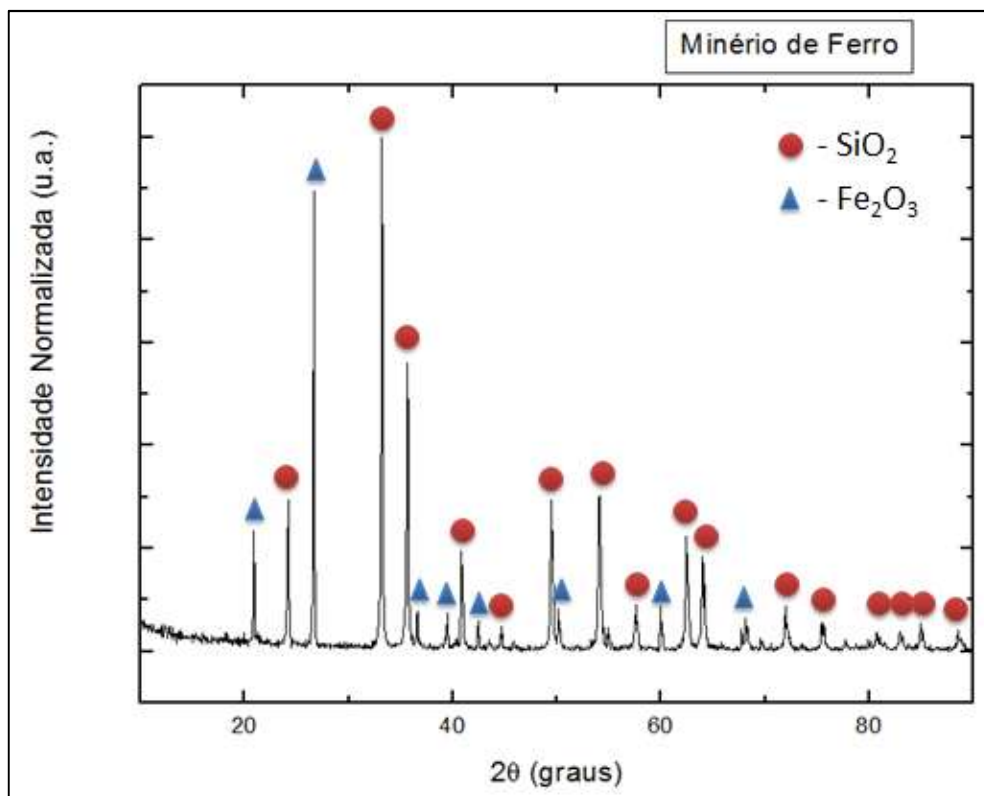


FIGURA 3.8 – Difratograma da amostra de minério de ferro.

Através da comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos no difratograma obtido e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data, foi possível verificar a presença das fases SiO₂ (quartzo) e Fe₂O₃ (hematita). O minério de ferro utilizado apresenta 65,9% de hematita e 34,1% de quartzo. A quantificação das fases presentes na amostra de minério de ferro foi realizada pelo método quantitativo de Rietveld a partir do difratograma obtido na análise por DRX.

Carga de abrasivo (C_a)

Uma carga de abrasivo (C_a) igual à 4,00kg foi utilizada para que um quarto do perímetro do tambor, ou seja, um quarto das amostras tivesse contato direto com o abrasivo, como mostrado na Figura 3.9.

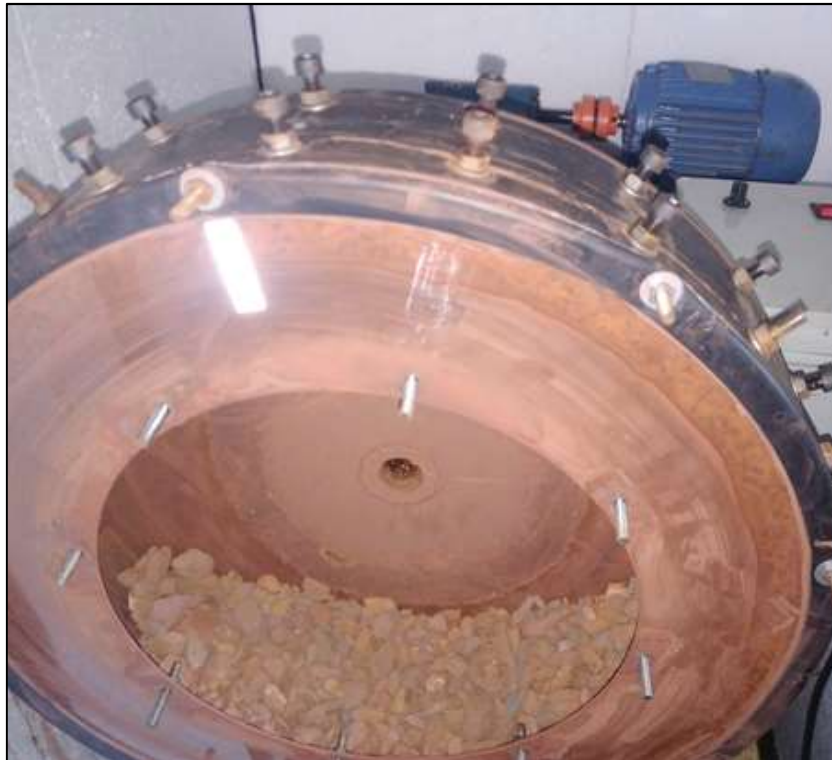


FIGURA 3.9 – Carga de minério de ferro no interior do tambor.

É apresentado na Tabela 3.1 os principais parâmetros de ensaio como já discutido nesse capítulo, essa tabela visa resumir e facilitar o entendimento da condução do experimento.

TABELA 3.1 - Parâmetros do ensaio de desgaste com abrasômetro de tambor.

A_t	A_{Gr} [mm]	V_R [rpm]	T_{tt} [horas]	I_{ta} [horas]	T_{tt}/I_{ta}	C_a [kg]
Minério de Ferro	4,75 à 19,00	45	90	18	5	4,00

3.3 Materiais ensaiados

Para esse ensaio foram estudados principalmente a resistência a abrasão de duas ligas depositadas sobre um aço ASTM A36 pelo processo de soldagem SMAW, e quatro tipos diferentes de Hardox®, aço esse conhecido pela sua alta resistência ao desgaste.

Considerando os 6 materiais estudados e melhor aproveitando os 20 espaços para amostras no tambor foram separadas três amostras de cada material, totalizando em 18 peças. Além destas, mais duas amostras de aço ASTM A36, semelhante ao usado como material de

base dos corpos de prova revestidos por soldagem, foram adicionadas ao número total de corpos de prova para servirem também como referência na comparação de resultados.

Para este estudo foram selecionadas duas ligas metálicas comerciais fabricadas pela Eutectic Castolin, desenvolvidas para oferecer resistência ao desgaste abrasivo e cuja a deposição é feita por soldagem manual de eletrodos revestidos (MMA – Manual Metal Arc ou SMAW – Shielded Metal Arc Welding). A primeira liga, denominada de liga A, é constituída do sistema Fe-Cr-C e a segunda liga, denominada de liga B, é constituída do sistema Fe-Cr-C-B. Essas ligas são utilizadas como revestimento duro na proteção de equipamentos e componentes de máquinas.

Para o Hardox® foram selecionados quatro tipos, sendo o grau de dureza o diferencial entre eles. Os materiais estudados foram o 450, 500, 550 e 600 HBW. Este aço tem o nome comercial de Hardox® e foi fornecido pela empresa SSAB.

3.3.1 Revestimento por soldagem

Os corpos de prova para estudo das ligas de revestimento duro foram soldados utilizando eletrodos de diâmetro nominal de 3,25mm. Foi utilizada uma fonte inversora multiprocesso modelo Aristo® Mig 4004i Pulse, marca ESAB, no processo SMAW. Essa fonte é acoplada ao controlador Aristo® Pendant U8₂ que é capaz de fornecer os valores médios de corrente de soldagem, tensão e tempo de arco aberto. Os parâmetros de soldagem foram verificados durante toda a operação com o auxílio desse controlador. É apresentada na Figura 3.10 a montagem utilizada para soldagem dos corpos de prova, com o detalhe da posição do cabo ligado ao porta eletrodo ser o pólo Negativo (CC-). Tal escolha foi realizada com o objetivo de minimizar a diluição.

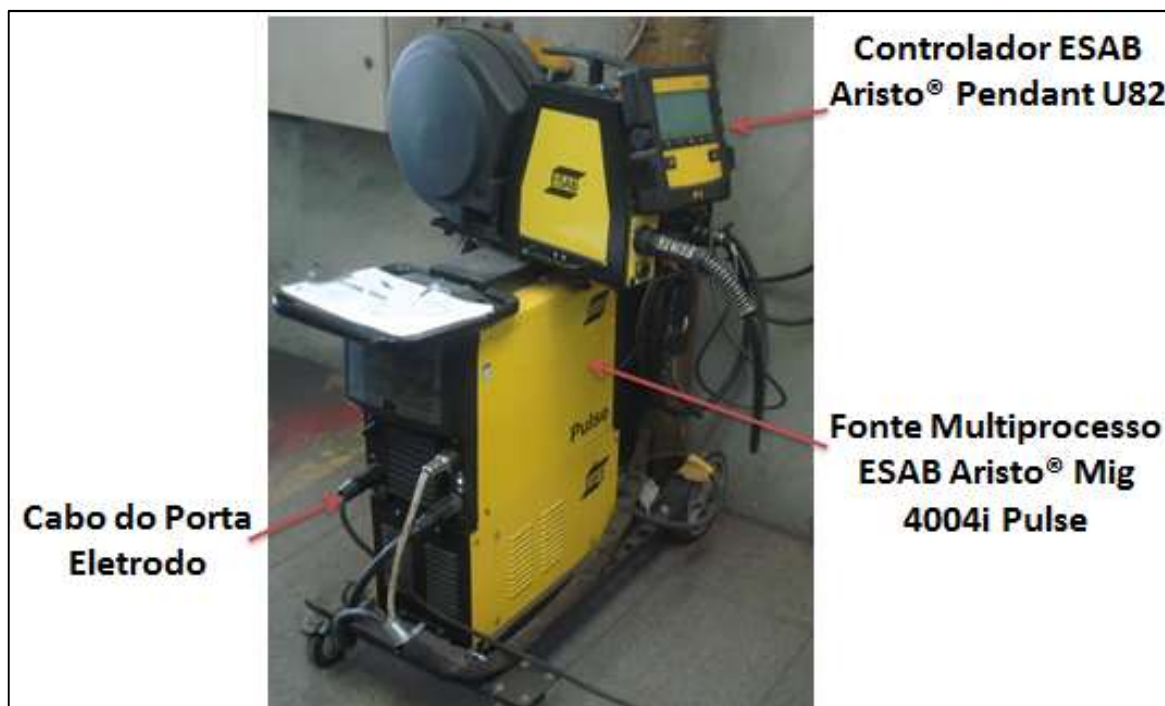


FIGURA 3.10 - Equipamento utilizado para soldagem dos corpos de prova.

As faixas de parâmetros de soldagem usadas para cada liga foram definidas em testes prévios variando-se a corrente de soldagem dentro do intervalo de 120 à 150 Ampères utilizando eletrodos de bitola de 3,25mm. O melhor parâmetro para cada liga foi definido a partir da percepção do soldador, onde se tinha melhor controle da poça de fusão, uma vez que a soldagem sobre o metal base era feita com oscilação, buscando revestir completamente a superfície do substrato. O substrato dos corpos de prova soldados foram chapas de aço ASTM A 36 de 12,7mm de espessura. As propriedades físico-químicas das ligas metálicas soldadas apresentadas neste trabalho, referem-se ao metal depositado dos corpos de prova.

Cada corpo de prova foi fabricado com a deposição de três camadas de solda sobrepostas sobre o material de base, sendo cada camada depositada com um único passe, conforme desenho esquemático mostrado na Figura 3.11. Devido a variações na altura da camada ao longo do corpo de prova, optou-se por alternar a direção de soldagem a cada camada para que ao final da operação a altura das três camadas sobrepostas tivesse a menor variação possível.

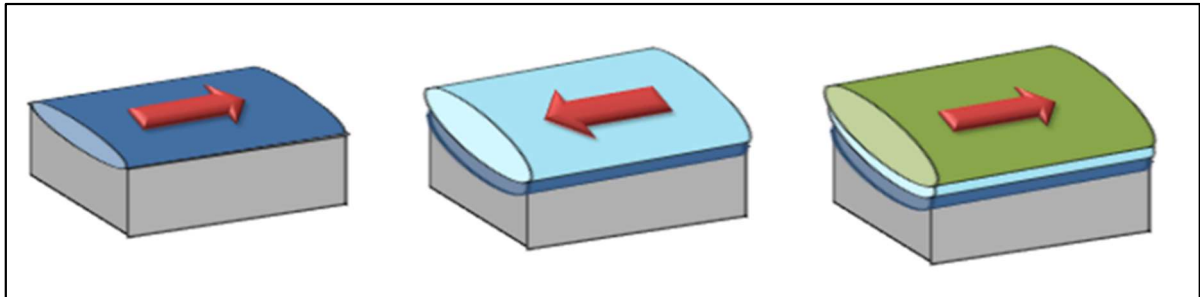


FIGURA 3.11 - Sequência de camadas de revestimento depositadas com direções alternadas.

Os corpos de prova soldados foram fresados nas quatro laterais para atender às dimensões de entrada do porta amostra (21mm x 46mm) para serem fixados posteriormente no mesmo. A superfície revestida também foi fresada com o objetivo de obter uma superfície plana para a realização do ensaio de resistência a abrasão, uma vez que a superfície do corpo de prova como soldado apresenta topografia irregular e poderia provocar distorções nos resultados.

Foram realizadas análises químicas nas superfícies de um corpo de prova de cada liga (Tabela 3.2). Foi realizada também análise química da chapa de aço ASTM A36 utilizada como substrato (Tabela 3.3). Os elementos Carbono e Enxofre foram analisados por extração à quente utilizando analisador de C e S da marca Eltra. Os demais elementos foram analisados por espectrometria de emissão atômica por plasma utilizando um Espectrofotômetro de Plasma da marca Perkin Elmer. Os resultados para a composição química das ligas é referente à superfície, ou seja, à 3ª camada de deposição.

TABELA 3.2 - Análise química dos corpos de prova revestidos de cada liga.

Elemento	Composição [% em peso]	
	Liga A	Liga B
C	4,57%	5,30%
Si	0,93%	1,29%
Mn	0,26%	0,33%
P	0,03%	0,02%
S	0,02%	0,02%
Cr	32,90%	43,42%
B	x	0,85%

TABELA 3.3 - Análise química da chapa ASTM A36 usada como substrato.

Elemento	Composição [% em peso]
C	0,13%
Si	0,003%
Mn	0,94%
Cu	0,01%
Al	0,03%
Ti	0,001%
Nb	0,01%

3.3.2 Aços Hardox®

Na preparação dos corpos de prova oriundos dos aços de alta resistência à abrasão, chapas de 500x500 mm de cada grau de dureza em análise foram cortadas por corte a plasma onde foi retirada uma tira de 50x500 mm de cada uma. De cada tira foram obtidos 5 corpos de prova de dimensões 27x52 mm cortadas em um policorte com refrigeração contínua. Essas dimensões foram determinadas com o objetivo de remover toda a região afetada pelo calor do corte a plasma e ainda se ter 3 mm de sobre metal para cada face lateral da amostra em relação a dimensão final do corpo de prova, esse sobremetal foi posteriormente fresado também com refrigeração abundante evitando mudanças microestruturais.

São apresentadas esquematicamente na Figura 3.12 as posições dos cortes realizados pelo plasma, as dimensões obtidas após cortes realizados com a policorte e por fim, as dimensões finais do corpo de prova após etapa de fresamento. Na Figura 3.13 é apresentada uma das chapas de aço de alta resistência à abrasão como recebida e ao lado as amostras já com as dimensões finais após a etapa de fresamento.

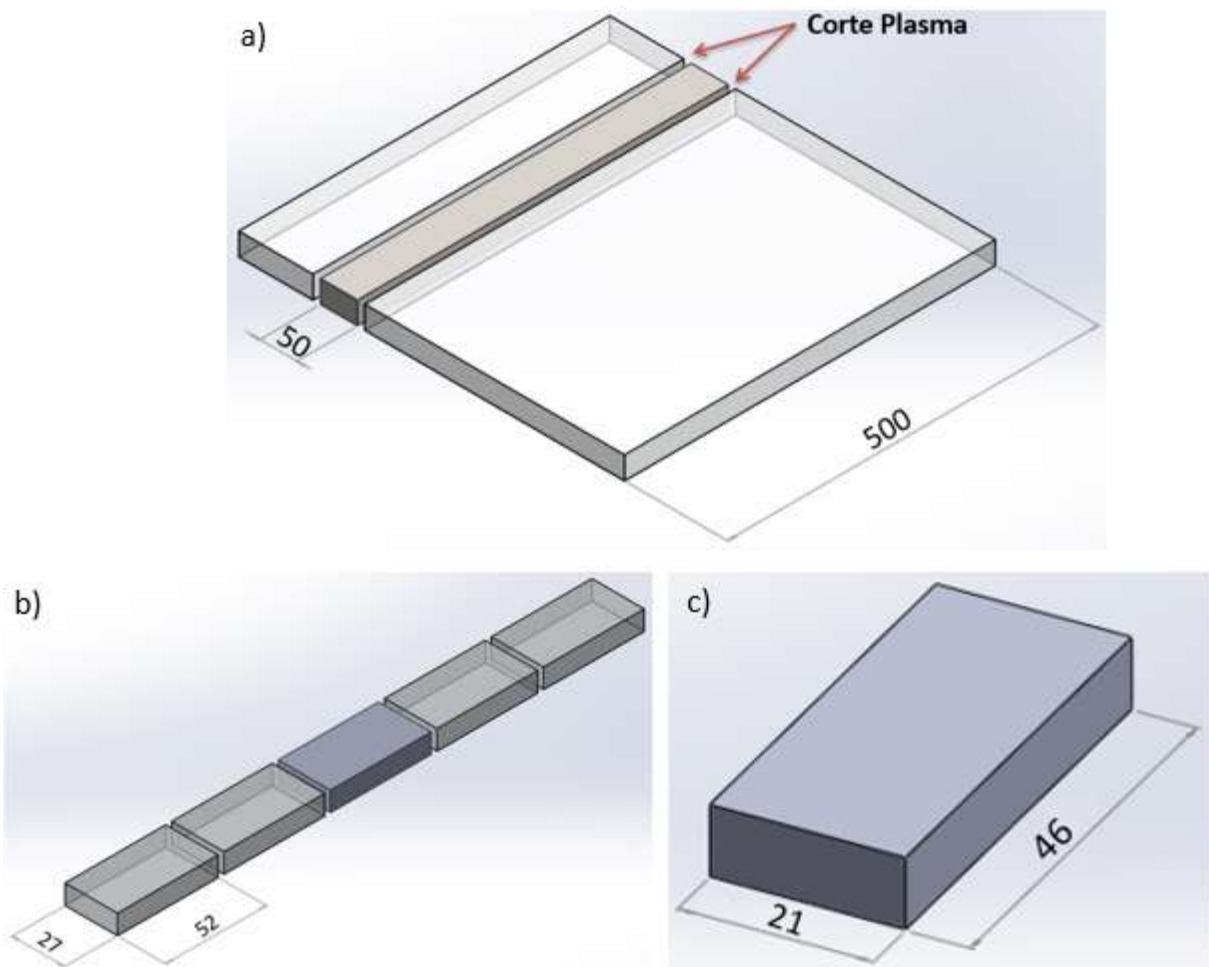


FIGURA 3.12 - a) Posição dos cortes a plasma. b) Corpo de Prova após cortes com a policorte. c) Corpo de Prova após etapas de corte e usinagem.

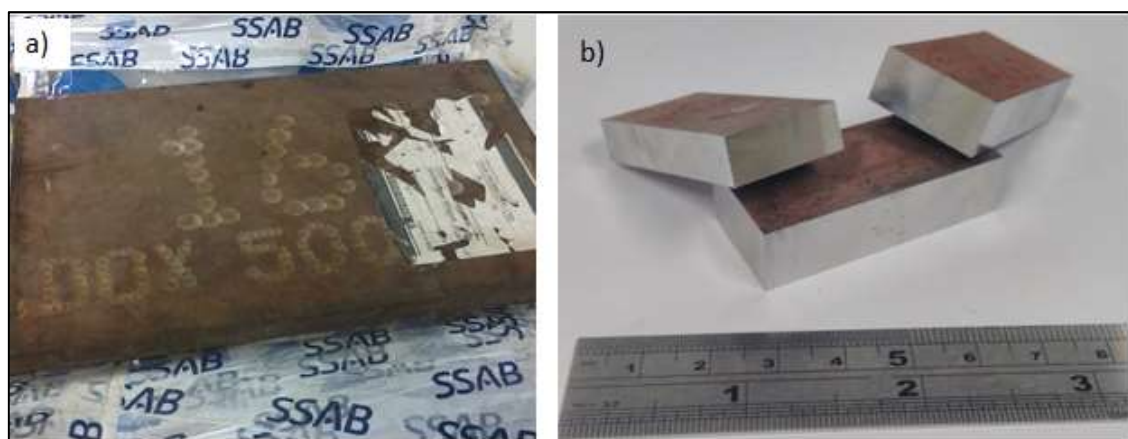


FIGURA 3.13 - a) Chapa de Hardox®. b) Corpo de Prova após etapa de fresamento.

Adicionalmente todos os corpos de Hardox® tiveram sua face superior retificada para que todas estivessem em condições superficiais semelhantes e também para retirada de pintura e

póxi, uma vez que os aços são fornecidos com esse recobrimento.

As composições químicas dos aços de alta resistência à abrasão foram fornecidas pela fabricante dos aços através dos respectivos certificados dos lotes doados para este estudo e são apresentadas na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 - Análise química dos aços Hardox® de alta resistência à abrasão.

Elemento	Composição [% em peso]			
	Hardox®450	Hardox®500	Hardox®550	Hardox®600
C	0,20%	0,24%	0,34%	0,41%
Si	0,26%	0,25%	0,21%	0,15%
Mn	1,38%	0,70%	0,62%	0,51%
P	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
S	<0,001%	0,002%	0,001%	0,001%
Cr	0,15%	0,60%	1,05%	0,28%
Ni	0,09%	0,05%	0,50%	1,97%
Mo	0,02%	0,05%	0,07%	0,14%
V	0,01%	x	x	0,01%
Cu	0,16%	x	x	0,01%
Al	0,06%	x	x	x
Ti	0,01%	x	x	x
Nb	0,01%	x	x	x
Sn	0,01%	x	x	x
B	0,0015%	0,001%	0,001%	0,001%
N	0,0037%	x	x	x
Ca	0,0012%	x	x	x

3.4 Preparação e posicionamento dos corpos de prova

Todos os corpos de prova antes de serem posicionados nos respectivos porta amostras foram identificados com as marcações apresentadas na Tabela 3.5. As designações “1, 2 e 3” foram colocadas na identificação para indicar qual corpo de prova estava sendo avaliado. Para as amostras do aço ASTM A36 foram atribuídas as designações “0 e 1”.

TABELA 3.5 - Identificação dos CP's usados no ensaio de desgaste.

Material	Amostras	Identificação CP's
Liga A	1	A - 1
	2	A - 2
	3	A - 3
Liga B	1	B - 1
	2	B - 2
	3	B - 3
Hardox® 450	1	450 - 1
	2	450 - 2
	3	450 - 3
Hardox® 500	1	500 - 1
	2	500 - 2
	3	500 - 3
Hardox® 550	1	550 - 1
	2	550 - 2
	3	550 - 3
Hardox® 600	1	600 - 1
	2	600 - 2
	3	600 - 3
ASTM A36	0	A - 36 - 0
	1	A - 36 - 1

Os CP's passaram por processo de limpeza através de banhos ultrassônicos em álcool isopropílico por três minutos, antes e após o ensaio de desgaste como mostrado na Figura 3.14.



FIGURA 3.14 - Limpeza dos CP's através de banho ultrassônico.

Os três corpos de prova (cp) de cada material estudado e os dois corpos de prova de aço carbono ASTM A36 foram devidamente posicionados de forma que a superfície do cp ficasse faceada com a superfície do porta amostra, ou seja, que estivessem no mesmo plano. Para isso, foi utilizada uma régua de controle onde o nivelamento era determinado pela não passagem de luz entre a régua e as superfícies tanto do cp quanto do porta amostra, como exemplificado na Figura 3.15.



FIGURA 3.15 - Verificação do alinhamento do cp com o porta amostra.

Já na Figura 3.16 é apresentado o posicionamento de cada conjunto dentro do abrasômetro de tambor. Foi adotado um procedimento de sequenciamento dos corpos de prova de cada material para que não ocorresse uma concentração de amostras de um mesmo material em uma dada região do tambor.

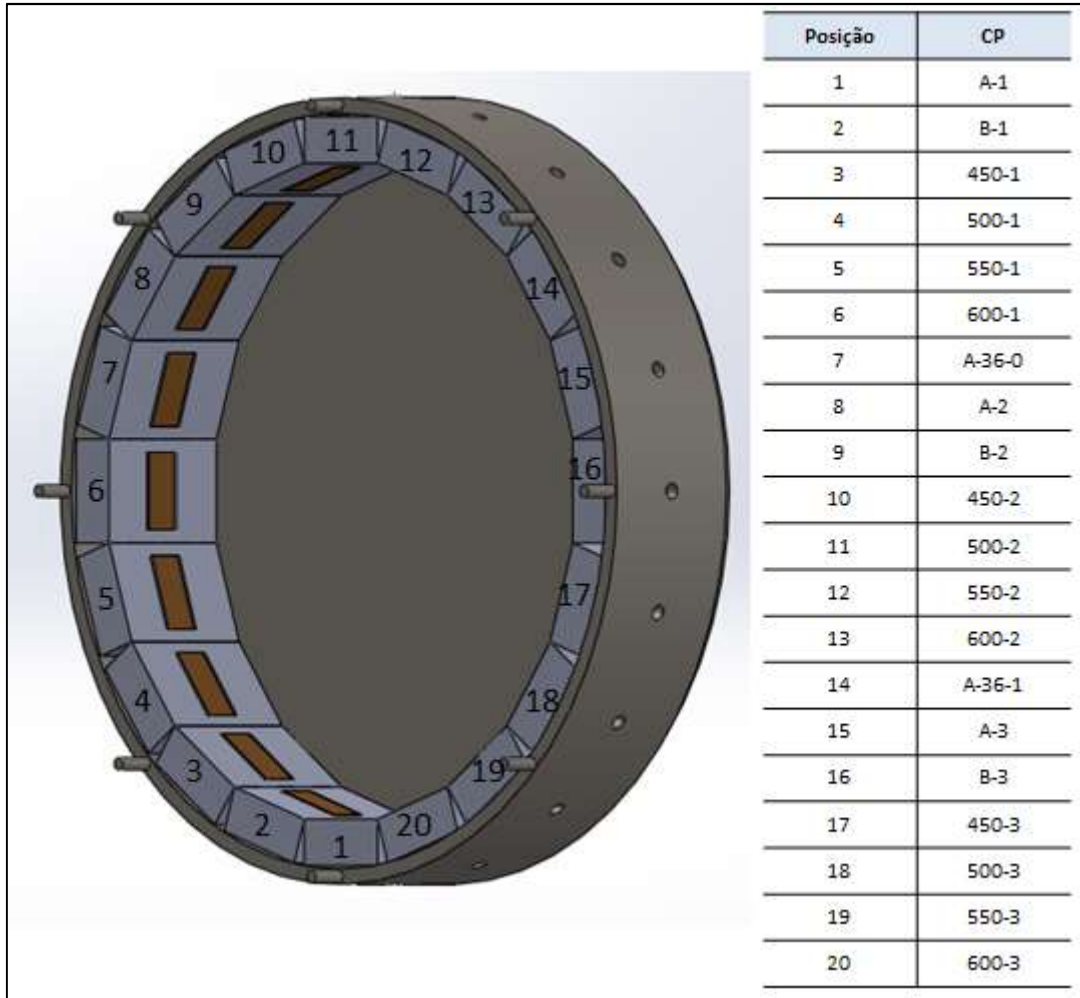


FIGURA 3.16 - Posicionamento dos conjuntos dentro do tambor do abrasômetro.

Na Figura 3.17 é apresentada a imagem do tambor após o posicionamento de todos os corpos de prova, semelhante ao esquema mostrado na Figura 3.16, como pode-se notar pela imagem, essa etapa é feita com o tambor desacoplado do restante da bancada, o que facilita a introdução das amostras.



FIGURA 3.17 - Tambor pronto para o ensaio, com os porta amostras posicionados e os corpos de prova em seu interior.

3.5 Caracterização dos materiais ensaiados

Antes de começar o ensaio todas as amostras passaram por uma etapa de caracterização, afim de relacionar o resultado da resistência abravisada à possíveis características mecânicas e metalúrgicas de cada material. Os testes realizados foram: DRX, análises metalográficas, ensaio de dureza e pesagem de cada corpo de prova.

A forma com que foram realizados os ensaios e os parâmetros envolvidos em cada um são discutidos à seguir.

3.5.1 Difração de Raios X - DRX

As superfícies dos corpos de provas foram submetidas a uma análise semi quantitativa por Difractometria de Raios-X em um equipamento marca PANalytical, modelo Empyrean, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$, tubo de raios-x de Cobre (Cu) e detector de Xenônio (Xe) com o objetivo de se caracterizar as fases presentes na superfície de cada material estudado. O

método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data.

3.5.2 Metalografia

Um corpo de prova de cada material foi cortado utilizando uma poliacorte com refrigeração abundante, conforme ilustrado na Figura 3.18, para retirada de amostra da seção transversal.

Essas amostras foram embutidas, lixadas, polidas com alumina 1 μ m e atacadas com Nital 2% com o objetivo de revelar a microestrutura das mesmas. A análise microestrutural foi realizada em microscópio óptico, marca OLYMPUS, modelo BX60M. Fotografias foram tiradas através do acoplamento do microscópio acima à uma câmera CCD SONY Hiper Had. As imagens foram captadas com o software HLImage. Na Figura 3.19 é mostrado o microscópio óptico usado acoplado a câmera.

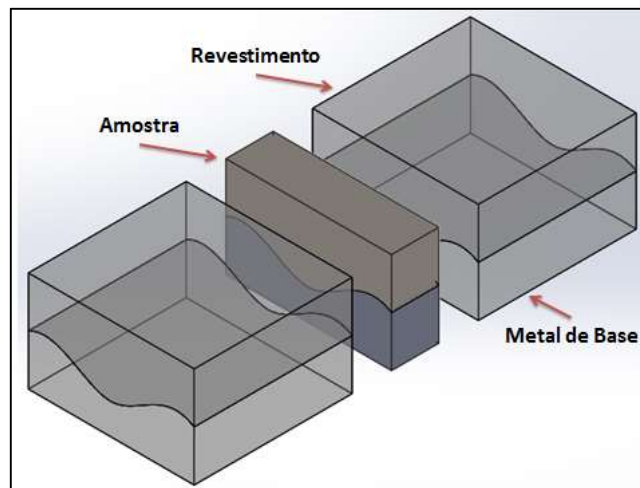


FIGURA 3.18 - Retirada de amostra para análise microestrutural.

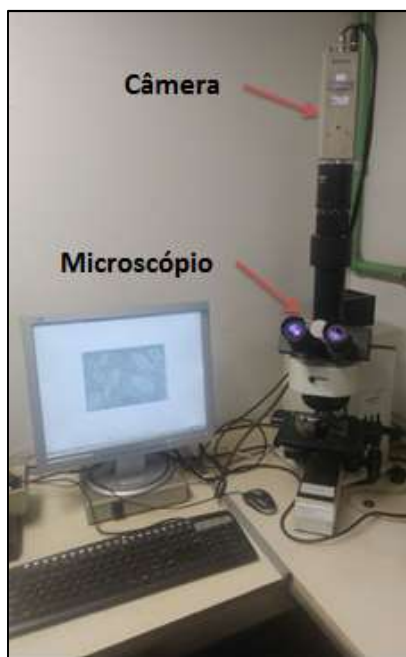


FIGURA 3.19 - Microscópio Óptico acoplado à camera.

Para a análise microestrutural dos revestimentos duros depositados por soldagem, além das micrografias obtidas com o microscópio óptico, foi utilizado também um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca TESCAN, modelo VEGA-3LMH, com espectroscopia por energia dispersiva (EDS), marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo X-ACT para melhor identificação dos constituintes formados. Na Figura 3.20 é mostrado o MEV com EDS usado.



FIGURA 3.20 - Microdurômetro usado nos ensaios de microdureza Vickers.

3.5.3 Ensaio de microdureza

Para a realização dos ensaios de microdureza Vickers as mesmas amostras da seção transversal dos corpos de prova de cada material obtidas para análise microestrutural foram utilizadas. Para a execução desses ensaios foi usado um microdurômetro marca SHIMADZU, modelo HMV-2T, com carga de 2,942 N e tempo de indentação de 5 segundos. O microdurômetro utilizado nos ensaios é mostrado na Figura 3.21.

O mesmo microdurômetro foi utilizado para medição da dureza superficial dos corpos de prova de cada material. Foram feitas 5 identações com carga de 9,807 N e tempo de indentação de 15 segundos em diferentes pontos das superfícies dos corpos de prova de cada material.

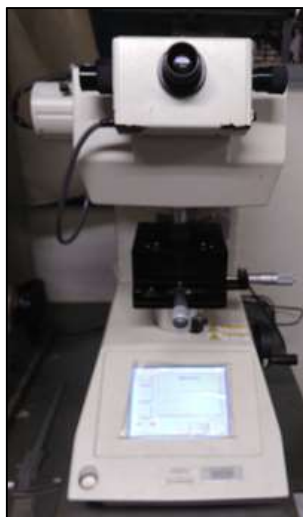


FIGURA 3.21 - Microdurômetro usado nos ensaios de microdureza Vickers.

3.5.4 Ensaio de dureza Rockwell C

Para a realização dos ensaios de dureza superficial Rockwell C foram utilizados os mesmos corpos de provas utilizados para os ensaios de microdureza superficial Vickers. Foram feitas 5 identações em pontos distintos das superfícies dos corpos de prova. Para a execução desses ensaios foi usado um durômetro marca REICHERTER, com carga de 150 kgf. O durômetro utilizado nos ensaios é mostrado na Figura 3.22.



FIGURA 3.22 - Durômetro usado nos ensaios de dureza Rockwell C.

3.5.5 Pesagem das amostras

Para verificação da perda de massa provocada pelo ensaio de desgaste os CP's foram pesados antes e após o ensaio em balança de precisão SHIMADZU, modelo BL – 320H com precisão de 0,001g. Os valores das medições antes e depois do ensaio de abrasômetro de tambor serão apresentados no capítulo de resultados. É apresentada na Figura 3.23 um exemplo de como foi realizada a pesagem.



FIGURA 3.23 - Pesagem dos CP's em balança de precisão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as análises metalográficas e os resultados para os ensaios de dureza, DRX e perda de massa dos materiais estudados no ensaio do abrasômetro de tambor. Além disso, será apresentado o resultado para a DRX da carga de minério utilizado como abrasivo no mesmo ensaio.

4.1 DRX

A difratometria de raios X é a principal técnica utilizada na identificação das fases presentes nas amostras. Além disso, é possível realizar a verificação da orientação preferencial dos grãos cristalinos, a determinação dos parâmetros de rede e a partir do difratograma obtido realizar uma análise quantitativa do percentual das fases presentes, entre outras análises.

4.1.1 Hardox®

Na Figura 4.1 é apresentada a análise por difratometria de raio-x do Hardox® 450 (H450), nela é possível constatar a presença marcante de martensita, identificada como α' .

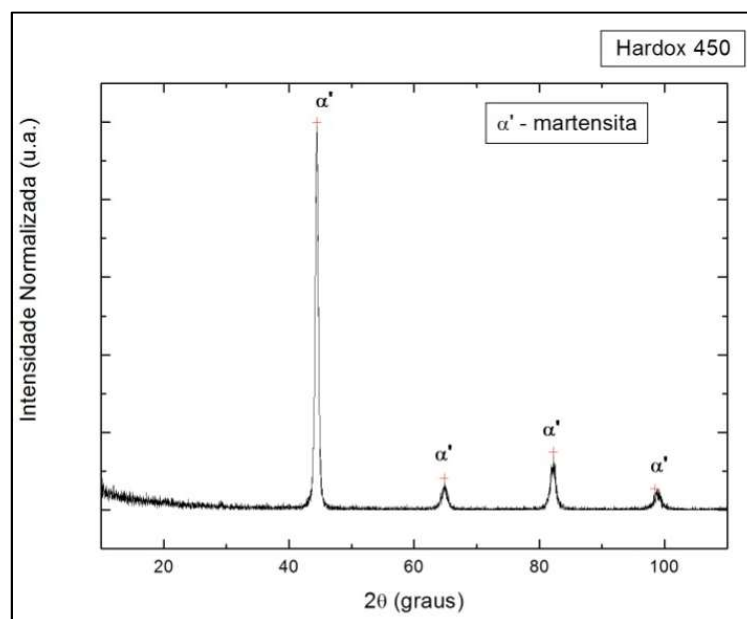


FIGURA 4.1 - Difratograma da amostra de Hardox® 450.

Nos outros tipos de Hardox® estudados, H500; H550 e H600 foram constatados os mesmos picos, mostrando que as microestruturas são muito semelhantes em relação à fase presente nestes materiais, basicamente martensíticos.

A presença quase que exclusiva de martensita confere a esses materiais uma elevada dureza. Sabe-se que a martensita expressa sua dureza em relação à quantidade de carbono presente no aço e na forma como essa microestrutura foi obtida, principalmente influenciada pelo tempo de resfriamento.

A análise de DRX aliada às micrografias e ensaios de dureza (que serão apresentados nos próximos subitens) é capaz de caracterizar melhor o material e entender quais os possíveis efeitos que sua microestrutura e composição têm na resistência ao desgaste.

4.1.2 Revestimentos por Soldagem

A mesma metodologia de difração de raios x foi utilizada no material depositado por soldagem de revestimento. Vale ressaltar que o DRX foi efetuado sobre a mesma superfície que é estudada no ensaio de perda de massa, ou seja, a curva de intensidade representa o material presente na 3ª e última camada de soldagem. Na Figura 4.2 é apresentada a curva para a Liga A, representada por Fe-C-Cr.

Constata-se pela Figura 4.2 que o material depositado pela Liga A tem a presença de austenita (γ) e como esperado dos carbonetos: $M_{23}C_6$; Fe_3C e M_7C_3 . Essa presença marcante de carbonetos de cromo é uma das principais responsáveis pela alta dureza expressa nessas ligas já que esses carbonetos apresentam durezas elevadas da ordem de 1000 a 1500 vickers, o que pode levar a um conseqüente aumento na resistência ao desgaste por esses materiais.

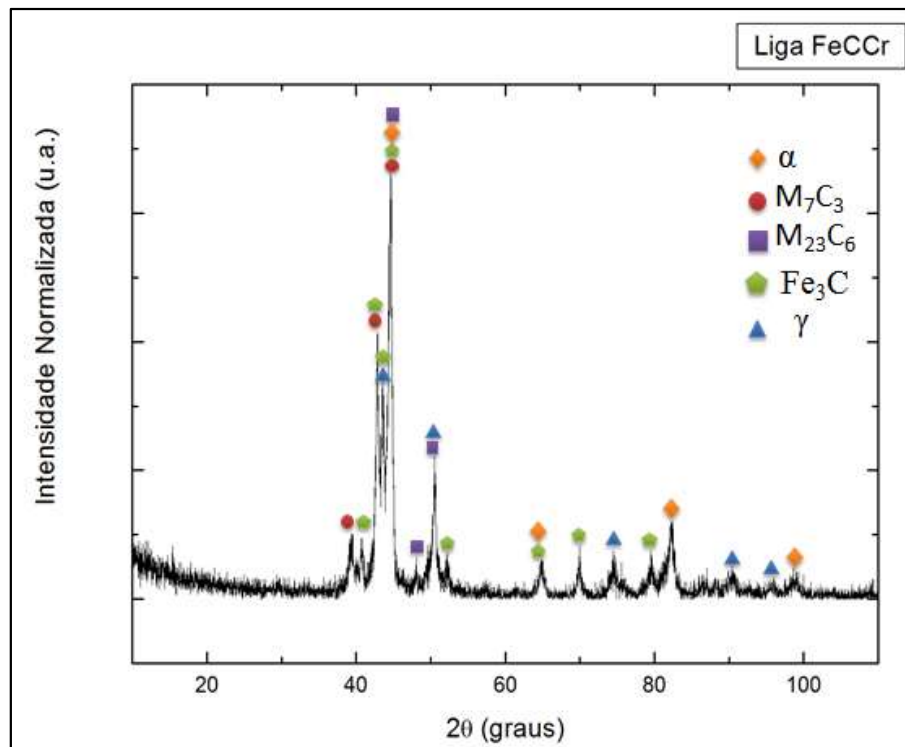


FIGURA 4.2 - Difratoograma obtido para a Liga A – Fe-C-Cr.

Na Figura 4.3 é apresentado o difratograma para a Liga B, representada por Fe-C-Cr-B, onde é possível verificar a presença de martensita e de carbonetos / boretos $M_{23}(C,B)_6$; $M_3(C,B)$ e $M_7(C,B)_3$. Destaca-se a ausência de austenita, que sofreu transformação martensítica promovida pela presença do elemento boro, o que garante boa resistência a abrasão, mas ao mesmo tempo gera fragilidade à estrutura conforme relatado por Petrovic et al, 2002. Além disso, segundo esses autores o boro altera as condições termodinâmicas de formação dos núcleos dos carbonetos e favorece especialmente a formação das fases $M_{23}(C,B)_6$ e $M_3(C,B)$ quando se trata de ferros fundidos brancos de alto cromo.

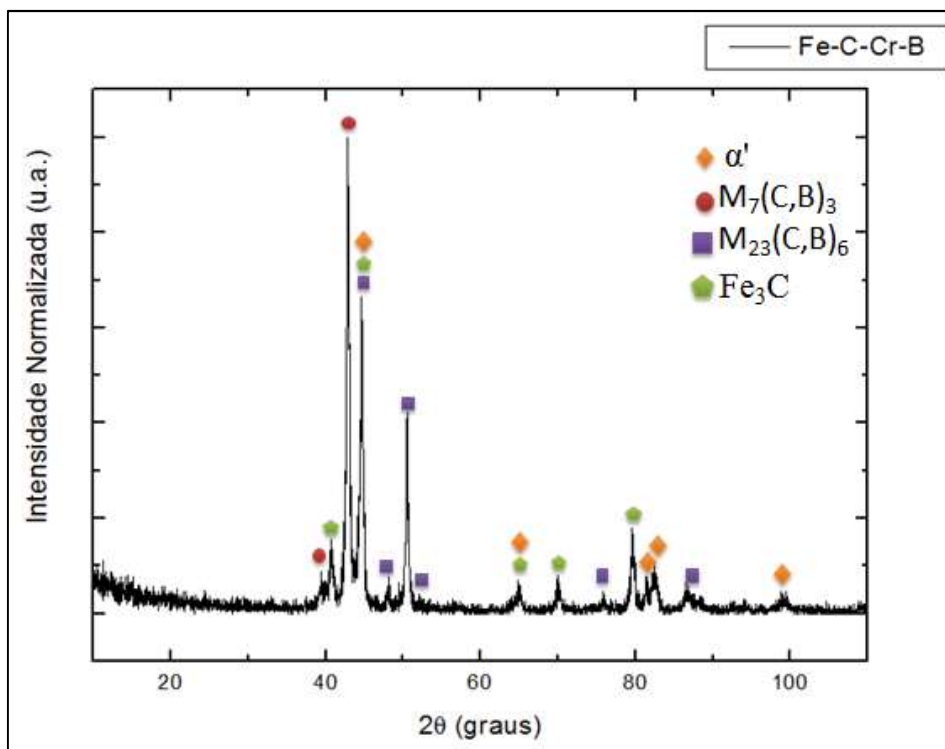


FIGURA 4.3 - Difratoograma obtido para a Liga B – Fe-C-Cr-B.

4.2 Análises Metalográficas

Com as análises metalográficas tem-se uma melhor compreensão da microestrutura, podendo avaliar a presença de carbonetos, visualizando seu tamanho e forma além das demais fases e constituintes presentes na matriz.

4.2.1 Hardox®

As análises de DRX do Hardox®, como vistas no subitem anterior, apresentaram picos de intensidade indicando apenas a presença de martensita nas amostras estudadas. Com as micrografias apresentadas na Figura 4.4 é possível confirmar este resultado.

É possível verificar também a diferença no “refinamento” da martensita em cada caso, sendo perceptível uma estrutura mais fina quanto maior é o grau do aço, ou seja, o H450 apresenta uma estrutura mais grosseira em relação ao H600.

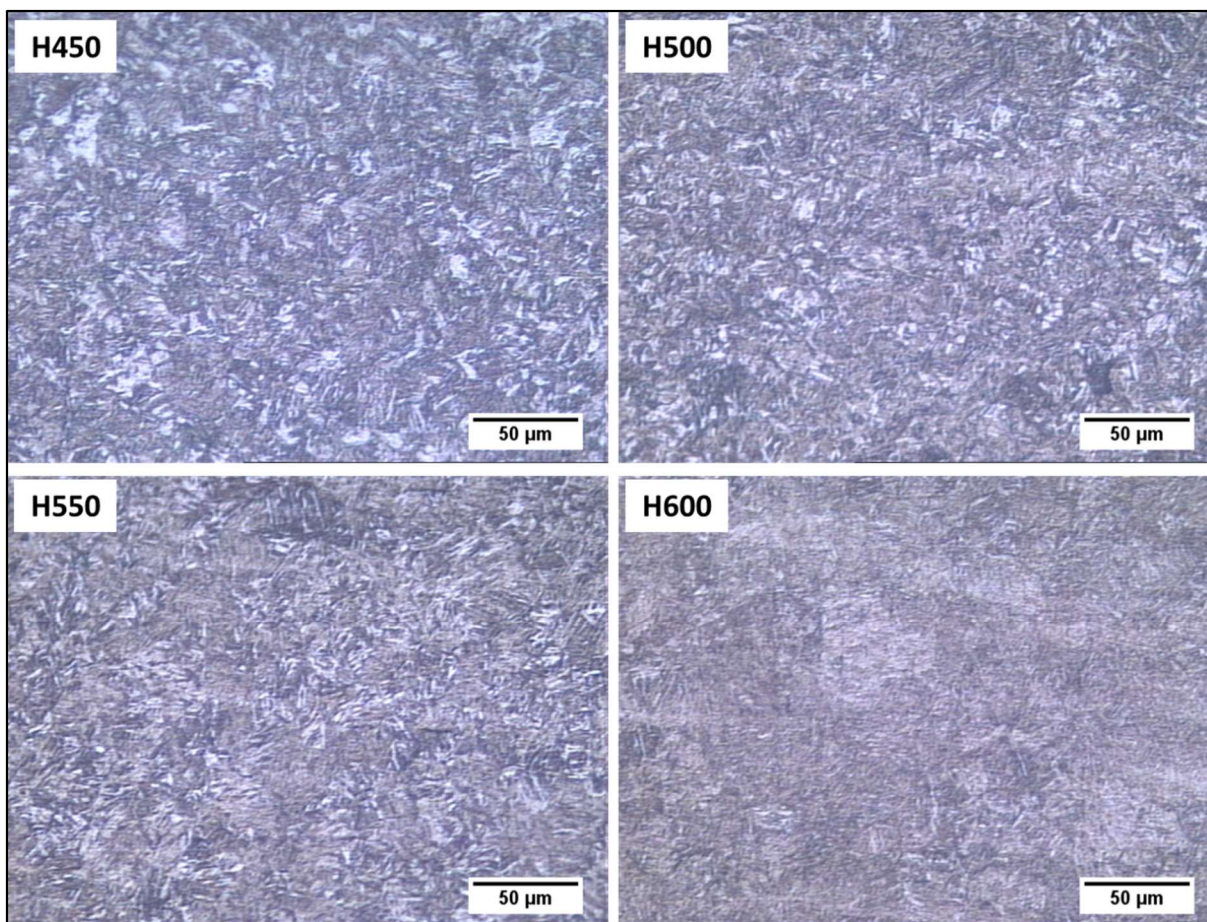


FIGURA 4.4 - Microestrutura martensítica dos aços Hardox® 450, 500, 550 e 600.

Essa diferença na estrutura martensítica pode e vai, como será apresentado a frente, contribuir com uma diferença nos valores de dureza e também na resistência ao desgaste abrasivo de cada material.

4.2.2 Revestimentos por Soldagem

Diferentemente dos aços Hardox® que apresentam microestrutura homogênea e com presença quase que exclusiva de martensita, as ligas soldadas apresentaram diversos constituintes microestruturais e carbonetos em sua formação (como apresentado pelo DRX). Para melhor estudo desses constituintes das Ligas soldadas A e B, fez-se o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) incluindo a espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Nele é possível visualizar a microestrutura com um maior aumento e definição do que através do microscópio óptico e possibilita estimar a composição química de pontos distintos da amostra,

o que é muito interessante para este trabalho, pois assim é possível verificar como os elementos estão distribuídos na matriz e as composições dos carbonetos presentes no material depositado.

Na Figura 4.5 é apresentada uma macrografia da seção transversal da Liga A após o embutimento da peça que foi obtida pelo método discutido no subitem 3.5.2. Nela é perceptível a presença de trincas de alívio de tensão, relativamente comuns para soldas de revestimento duro.

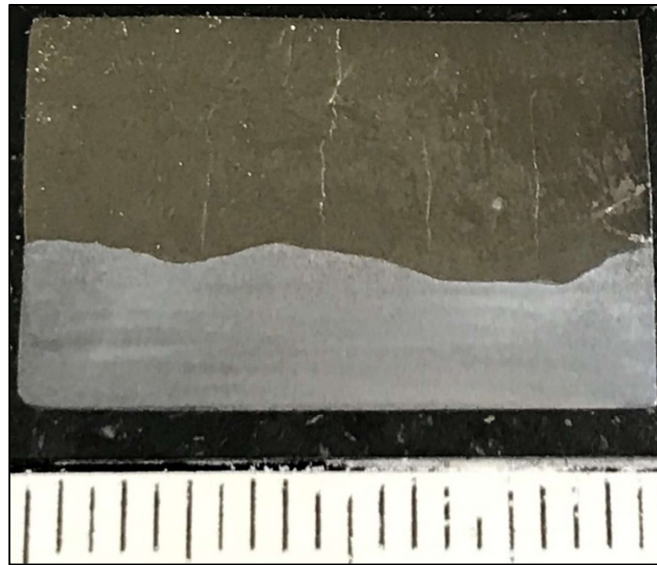


FIGURA 4.5 - Macrografia da seção transversal do cp embutido- Liga A.

Na Figura 4.6 são apresentadas micrografias de 3 diferentes posições na seção transversal do corpo de prova soldado com a Liga A. As posições foram escolhidas a partir da macrografia, tentando atingir as 3 camadas distintas de deposição. As micrografias foram obtidas no MEV e além das imagens foram levantadas também as composições químicas de diferentes pontos na amostra através do EDS.

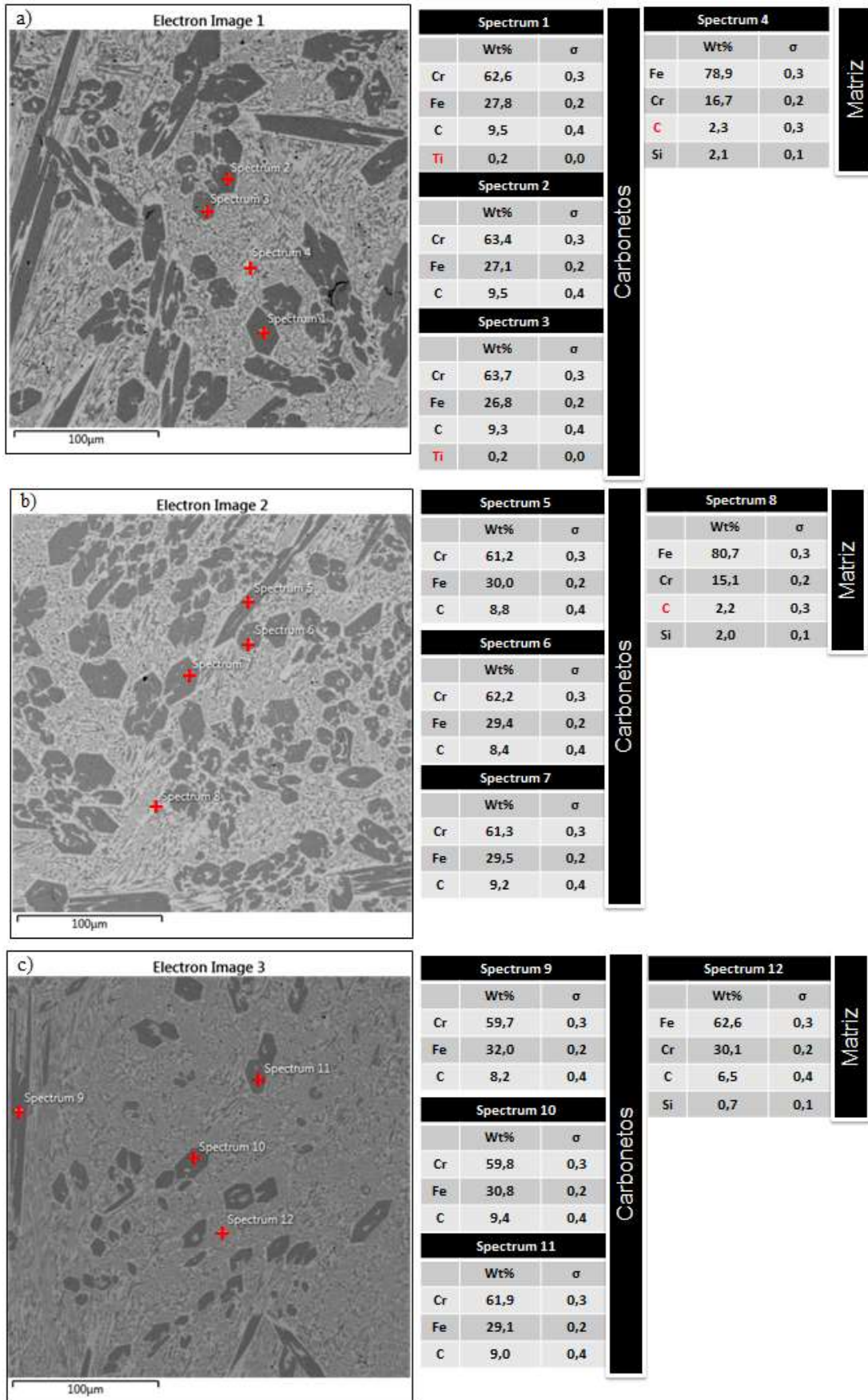


FIGURA 4.6 - Micrografias da seção transversal do revestimento depositado com a liga A. a) Topo. b) Intermediária. c) Base.

Na Figura 4.6a, observa-se a microestrutura da região do topo do revestimento aplicado com a liga A (Fe-Cr-C) após a usinagem para planificação da superfície da amostra. A microestrutura é formada por carbonetos primários dos tipos M_7C_3 e $M_{23}C_6$ (identificados através da análise do difratograma obtido no ensaio de DRX) com formato poligonal envolvidos em uma matriz composta por um constituinte eutético, de austenita mais carbonetos eutéticos M_7C_3 . Concordando com as observações realizadas por Borle et al (2015) e Tang et al (2011) de que uma liga hipereutética é composta de carbonetos primários em uma fase eutética formada de austenita e carbonetos. As áreas escuras da Figura 4.6a são carbonetos primários de cromo, Cr_7C_3 , representados pelos pontos 1, 2 e 3 da análise com EDS. O ponto quatro representa uma região de constituinte eutético.

É importante destacar que o carboneto do tipo $M_{23}C_6$ foi identificado através do ensaio de DRX da amostra, contudo não foi possível diferenciá-lo nas imagens obtidas no MEV e nas análises químicas locais realizadas com o uso do EDS. Tang et al (2011) verificou que para ferros fundidos de alto cromo (45% Cr – 4% C), a microestrutura apresentava carbonetos primários com estrutura chamada “duplex” consistindo seu interior de M_7C_3 e uma camada externa ou “casca” de $M_{23}C_6$. Esse fato corrobora para a difícil diferenciação da fase $M_{23}C_6$.

Segundo Kotecki e Ogborn (1995) essas ligas hipereutéticas, contendo carbonetos primários em uma matriz eutética de austenita mais carbonetos, estão entre as que possuem uma microestrutura mais favorável em termos de resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões.

Na Figura 4.6b, observa-se a microestrutura de uma região intermediária do revestimento aplicado com a liga A (Fe-Cr-C). A microestrutura observada é semelhante a da região do topo não havendo aparentemente uma diferenciação entre a fração volumétrica e o tamanho dos carbonetos, apesar desses fatores não terem sido dimensionados. Pode-se observar que as análises químicas obtidas com o EDS são semelhantes às anteriores, tanto para os carbonetos (pontos 5, 6 e 7), quanto para a matriz (ponto 8).

Entretanto, é perceptível essa diferença quando se compara as microestruturas do topo e intermediária com a microestrutura observada na primeira camada depositada, denominada na Figura 4.6c como “base”. Verifica-se ainda a formação de carbonetos primários (pontos 9, 10 e 11) em uma matriz eutética de austenita e carbonetos primários, todavia é visível que a fração volumétrica e o tamanho dos carbonetos são menores. Através da análise por EDS da matriz (ponto 12) é possível notar que há uma maior concentração de carbono e aproximadamente o dobro do percentual de cromo quando comparado com os resultados da

análise por EDS das matrizes anteriores da região intermediária e de topo do revestimento. Esse fato demonstra que não foi a totalidade de carbono e cromo disponíveis na matriz que se associaram para a formação de carbonetos primários.

Borle et al (2015) descreve que microestruturas totalmente hipereutéticas são desejadas para uma melhor resistência a abrasão, mas que tradicionalmente ligas hipereutéticas podem conter as três microestruturas possíveis: hipereutética, eutética e hipoeutética, como foi mostrado na Figura 4.6c. Diz ainda que essa variação é representativa em revestimentos do tipo Fe-C-Cr em geral e que não são tipicamente observadas em estruturas com mesma composição fundidas. Isso ocorre devido à diferença de composição química ao longo da altura do cordão de solda.

A Figura 4.7 apresenta uma micrografia da região próxima à linha de fusão do revestimento realizado com a liga A, determinando a interface entre o substrato e o revestimento. Pode-se observar que próximo a linha de fusão a microestrutura é composta por dendritas de austenita e constituinte eutético de austenita mais carbonetos primários do tipo M_7C_3 . Segundo Borle et al (2015) quando a composição química está na região austenítica do diagrama C-Cr, a microestrutura resultante é hipoeutética. Nesse caso a solidificação se inicia com as dendritas primárias de austenita e em seguida como constituinte eutético de austenita mais carbonetos do tipo M_7C_3 .

No entanto, como o eletrodo e as condições de soldagem utilizadas visam menor diluição possível, percebe-se que na região superior, ainda na primeira camada, têm-se carbonetos primários formados, característicos de uma liga hipereutética.

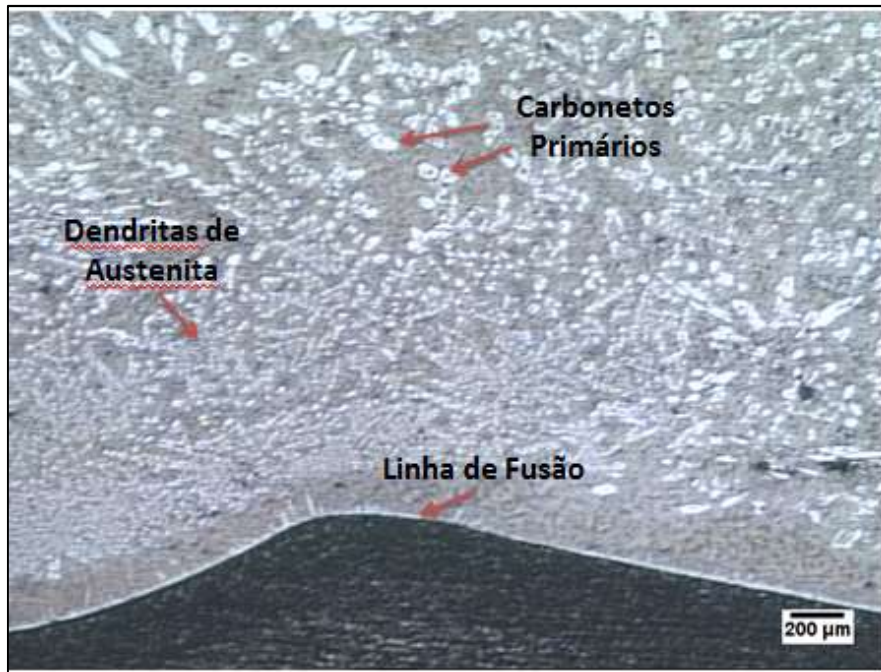


FIGURA 4.7 - Micrografia da região inferior do revestimento depositado com a liga A.

Seguindo a mesma metodologia para a análise metalográfica apresentada na Liga A, tem-se na Figura 4.8 a macrografia da seção transversal do corpo de prova soldado com a Liga B. Nele é perceptível também a presença de trincas, mais numerosas e com aspecto mais intenso que as trincas constatadas na Liga A devido à dureza das fases formadas serem possivelmente maiores e conseqüentemente sua ductilidade ser menor, sendo mais susceptível a trincas de alívio de tensão.

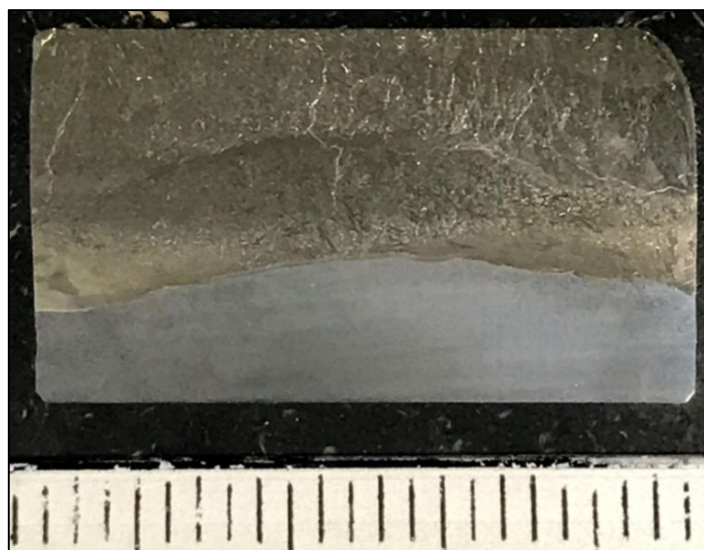


FIGURA 4.8 - Macrografia da seção transversal do cp embutido- Liga B.

No corpo de prova retirado da Liga B também foi feita uma análise no MEV e houve o levantamento de composição química através do EDS de alguns pontos nas três diferentes camadas de deposição.

A principal busca no levantamento por EDS em alguns pontos é a busca pela composição dos carbonetos e boretos formados durante a soldagem e presentes nas amostras. São esses carbonetos e boretos, em conjunto com a matriz, que darão as propriedades mecânicas e estará relacionado à resistência ao desgaste do material.

Contudo, sabe-se que a estimativa da composição química feita por EDS não é muito precisa para elementos leves como o carbono e o boro. Sendo necessários cuidados adicionais em relação à técnica para uma leitura mais adequada dos picos referentes a esses elementos. Um dos cuidados necessários seria a aplicação de uma tensão otimizada, normalmente mais baixa, para esses elementos. Alguns equipamentos e softwares recentemente desenvolvidos já possuem recursos para contornar essas dificuldades (BERLIN, 2011).

Não foi possível comprovar o percentual do elemento boro na composição química das fases analisadas por EDS, mas sabe-se da sua presença uma vez que seu percentual foi determinado na análise química e as fases foram identificadas via DRX. As micrografias realizadas pelo MEV são apresentadas na Figura 4.9.

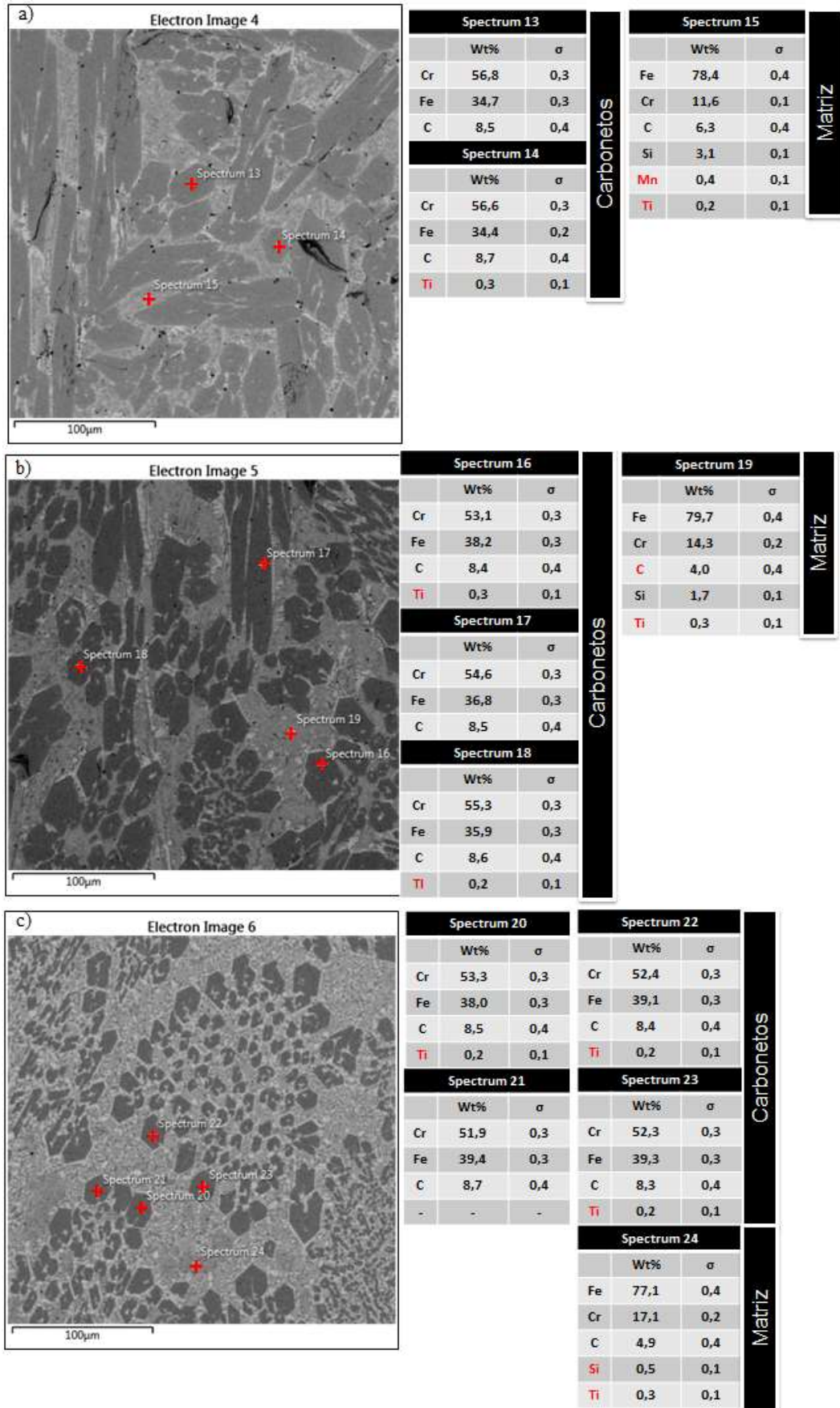


FIGURA 4.9 - Micrografia da região do topo do revestimento depositado com a liga B. a) Topo. b) Intermediária. c) Base.

Na Figura 4.9a, observa-se a microestrutura da região do topo do revestimento aplicado com a liga B (Fe-Cr-C-B) após a usinagem para planificação da superfície da amostra. A microestrutura é formada por carbonetos ou boretos dos tipos M_7C_3 e $M_{23}(C,B)_6$ (identificados através da análise do difratograma obtido no ensaio de DRX), representados pelos pontos 13 e 14 da análise por EDS, com formato poligonal envolvidos em uma matriz composta por um constituinte formado por martensita mais carbonetos e boretos, podendo ser também do tipo $M_3(C,B)$ representada pelo ponto 15 na mesma Figura. Quando comparada a microestrutura obtida com a liga Fe-C-Cr, verifica-se um refinamento da microestrutura como relatado por Kim et al (2009). Segundo esses autores, com a adição de boro é de se esperar um refinamento dos grãos de austenita e a promoção da transformação martensítica. Além disso, afirmam que a formação de boretos primários pode ser útil para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo devido a sua alta dureza, tendo grande potencial para fornecer uma excelente resistência ao desgaste.

Segundo Tang et al (2011) um aumento da fração volumétrica dos carbonetos é alcançada com o um aumento na concentração de elementos formadores de carbonetos, como o cromo, o carbono e também o boro, suportando o crescimento dos carbonetos. Essa afirmação justifica o aumento do tamanho e da quantidade de carbonetos presentes na camada superior de revestimento quando comparadas as regiões intermediárias e da primeira camada, como pode ser percebido nas Figuras 4.9b e 4.9c respectivamente. Com a sobreposição de camadas de revestimento o efeito causado pela diluição do material de base é reduzido fazendo com que as concentrações desses elementos formadores de carbonetos sejam cada vez maiores.

Yüksel e Sahin (2014) relataram a diminuição da concentração de cromo nas fases duras, ou seja, nos carbonetos e boretos, com o aumento do percentual de boro. Essa afirmação pode ser facilmente comprovada quando se compara os percentuais de cromo obtidos nas análises realizadas por EDS nos carbonetos e boretos primários formados para os revestimentos realizados com a liga A e com a liga B.

Na Figura 4.9c observa-se que já na primeira camada de revestimento tem-se a formação de carbonetos e boretos primários, representados pelos pontos 20, 21, 22 e 23 da análise por EDS. Esse fato é de extrema importância no que se refere ao baixo efeito da diluição sobre a liga hipereutética depositada pelo eletrodo. Verifica-se também que apesar da fração volumétrica de carbonetos e boretos primários (não calculada – apenas visualmente

considerada) ser menor na primeira camada do que nas camadas superiores, quando se compara com a primeira camada da liga A, esta é muito superior.

4.3 Microdureza

Após ter a análise química dos materiais estudados, possuir também micrografias e análises de DRX, passa-se agora para a análise da propriedade mecânica que alguns autores indicam ser a propriedade que está mais relacionada à resistência ao desgaste, a dureza.

Apesar de não ser regra de que materiais mais duros são mais resistentes à abrasão, observa-se em muitos casos uma tendência de que isso aconteça e por isso é tão importante o levantamento dessa propriedade.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores para as durezas superficiais das amostras e a média dos valores obtidos, cada corpo de prova foi indentado cinco vezes em diferentes pontos com carga de 9,807 N por 15 segundos.

TABELA 4.1 - Dureza Vickers da superfície para os materiais. Valores em Vickers (HV).

Dureza Superficial						
Carga: 9,807 N			Tempo:15 s			
Identação	H450	H500	H550	H600	Liga A	Liga B
D1	489	536	542	559	720	746
D2	490	521	553	556	772	720
D3	488	513	548	559	697	720
D4	488	517	558	570	720	865
D5	488	505	530	569	772	746
Dmédia [HV]	488,6	518,4	546,2	562,6	736,2	759,4
DesvPad	0,9	11,5	10,8	6,4	34,0	60,4

Como constatado, as ligas depositadas por soldagem apresentaram maiores valores de dureza superficiais quando comparado aos Hardox®. Entre as ligas, a Liga B apresenta valores ligeiramente maiores quando comparados à Liga A. Verifica-se que o desvio padrão obtido para as ligas é maior que o desvio padrão obtido para as chapas laminadas de Hardox®. Acredita-se que a menor dispersão observada para as chapas laminadas se deve a homogeneidade da microestrutura apresentada pelas chapas laminadas, o que não ocorre nos depósitos soldados de revestimento duro. Outra justificativa para essa diferença é a presença de

trincas de alívio de tensão na superfície dos corpos de provas das ligas soldadas, que podem eventualmente, interferir na medição da dureza.

Entre os Hardox®, tem-se um aumento da dureza à medida que aumenta-se o grau do aço, o que era esperado. Apesar de apresentarem uma microestrutura basicamente martensítica, existe a diferença no refino da microestrutura e isso reflete nessa diferença na dureza dos materiais. Contudo, os valores de dureza obtidos para o Hardox® 450 e 600 estão fora dos limites estipulados pelo fabricante de acordo com o respectivo *data sheet* de cada produto (SSAB, 2017). No caso do Hardox® 450 a dureza ficou ligeiramente acima do máximo estipulado que é de 475HBW (dureza Brinell), que convertida em dureza Vickers tem-se aproximadamente 485HV. Já no caso do Hardox® 600 a dureza ficou abaixo do mínimo definido pelo fabricante que é de 570HBW. Convertendo em dureza Vickers tem-se que 550HBW correspondem a 569HV.

Diante desses resultados buscou-se fazer uma verificação para esses dois graus do aço Hardox® através de um ensaio de dureza Rockwell C, com uma carga de 150kg. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2. Verifica-se que os novos resultados obtidos atendem as especificações do fabricante uma vez que o valor de 42,8HRC medido para o Hardox® 450 está entre 425HBW e 475HBW, quando se faz a conversão. Da mesma forma, o valor de 54,2HRC obtido para o Hardox® 600 também está entre 570HBW e 640HBW.

TABELA 4.2 - Dureza Rockwell C da superfície para os materiais Hardox® 450 e 600.

Dureza Superficial Rockwell C		
Identação	H450	H600
D1	45	54
D2	46	54
D3	45	54
D4	39	54
D5	39	55
Dmédia [HRC]	42,8	54,2
DesvPad	3,5	0,4

4.3.1 Dureza nos carbonetos das ligas soldadas

A diferença entre as durezas nas ligas soldadas também é explicada pela microestrutura presente no material. Como a microestrutura das amostras soldadas são compostas de carbonetos cercados por uma matriz eutética de austenita mais carbonetos ou de martensita mais carbonetos, esse trabalho buscou medir a dureza desses componentes nas duas

ligas soldadas e obter resultados separados dessa propriedade para a matriz e para os carbonetos formados em cada caso.

Sendo assim a Figura 4.10 apresenta identações para medição da dureza que foram feitas apenas no carboneto e apenas na matriz. A diferença dos tamanhos observados entre as identações representa a diferença nos valores de dureza para esses pontos, ou seja, identações de maior tamanho para a matriz, mostrando que essas regiões apresentam menor dureza.

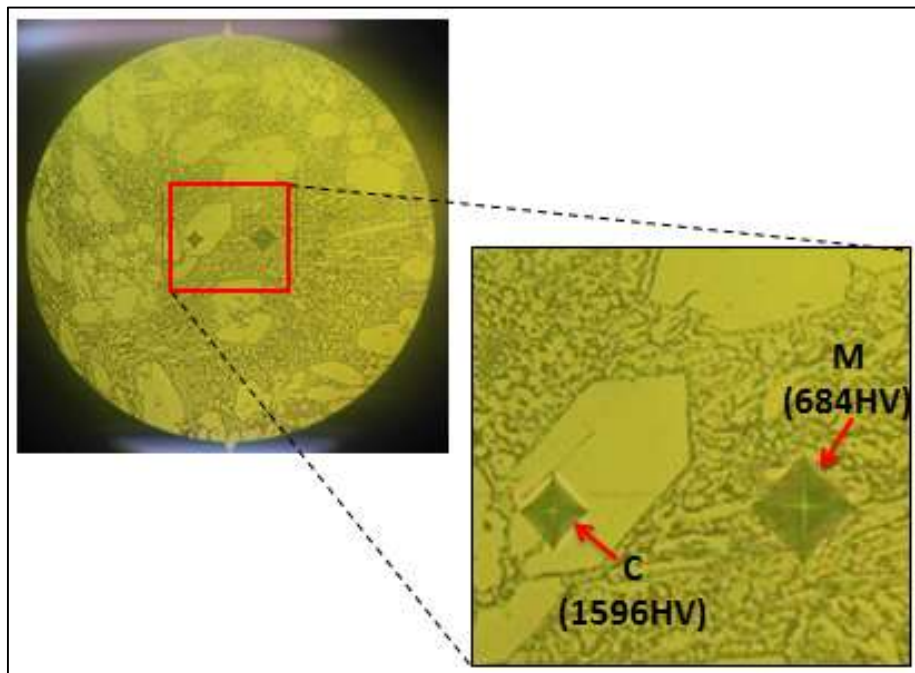


FIGURA 4.10 – Microdurezas realizadas sobre o carboneto (C) e sobre a matriz (M) com seus respectivos valores em Vickers.

Nas Tabela 4.3 e 4.4 são apresentados os valores dessa propriedade para identações realizadas sobre diferentes carbonetos e regiões da matriz para a Liga A e Liga B, respectivamente. A identações foram realizadas com carga de 2,942 N por 5 segundos.

TABELA 4.3 - Tabela com valores de dureza para matriz e carbonetos da Liga A.

Microdureza Vickers - [HV]							
884	1883	782	875	1160	804	914	860
802	793	806	793	873	801	706	1015
782	867	1340	1618	1124	927	1133	931
1422	1510	1300	814	1377	694	730	903
976	1144	982	1317	743	1315	685	773
1377	991	892	981	1105	807	950	688

**Valores acima de 1000HV foram destacados, evidenciando participação dos carbonetos.*

TABELA 4.4 - Tabela com valores de dureza para matriz e carbonetos da Liga B.

Microdureza Vickers - [HV]							
1527	893	1919	1762	1786	1530	1743	1636
1384	1458	1665	1131	988	2052	1380	1995
1371	1709	1382	1235	1842	1746	888	915
1139	1075	1028	1012	1576	954	1860	951
839	1031	632	1777	1743	1777	985	1473
828	1281	1186	810	1461	1359	1821	1190

**Valores acima de 1000HV foram destacados, evidenciando participação dos carbonetos.*

É evidenciado através de análises das Tabelas 4.3 e 4.4 a participação marcante de carbonetos na microdureza em diferentes pontos nas ligas soldadas, os altos valores de durezas resultantes dos carbonetos fazem com que resultados de dureza também se tornem mais elevados, já que em um ensaio de dureza a área da indentação envolve uma “mistura” de matriz e carbonetos.

A comparação entre as Tabelas 4.3 e 4.4 mostra ainda que há uma maior quantidade de pontos de elevada dureza, aqui considerados os acima de 1000HV, na Liga B em relação à Liga A, sendo esse aumento devido à maior presença de carbonetos, já que essa liga conta também com a adição de boro que contribui para a formação destes.

4.4 Perda de Massa

O resultado para a perda de massa comparativa é o resultado mais importante deste trabalho, pois ele está ligado diretamente à resistência a abrasão do material para o sistema ensaiado, ou seja, quanto menor a perda de massa, maior a resistência à abrasão do material.

Vale ressaltar que os materiais foram ensaiados em um sistema em que o minério de ferro era o agente abrasivo, fornecendo um resultado mais preciso para esse estudo em relação às aplicações na indústria. O minério de ferro é encontrado em diversos seguimentos da indústria extrativa, sendo esse abrasivo o que entrará em contato com componentes e equipamentos quando em serviço. Em contrapartida esse resultado é restrito ao minério de ferro, ou seja, não é viável extrapolar esse resultado para outros tipos de agentes ou mecanismos de desgaste que não sejam o minério de ferro e abrasão respectivamente.

Na Figura 4.11 é apresentado um gráfico com os valores de perda de massa para cada amostra após as 90 horas de ensaio e os resultados numéricos são apresentados na Figura

4.12. Na Figura 4.13 pode-se observar o aspecto das superfícies de alguns corpos de prova antes e depois do ensaio de desgaste de tambor.

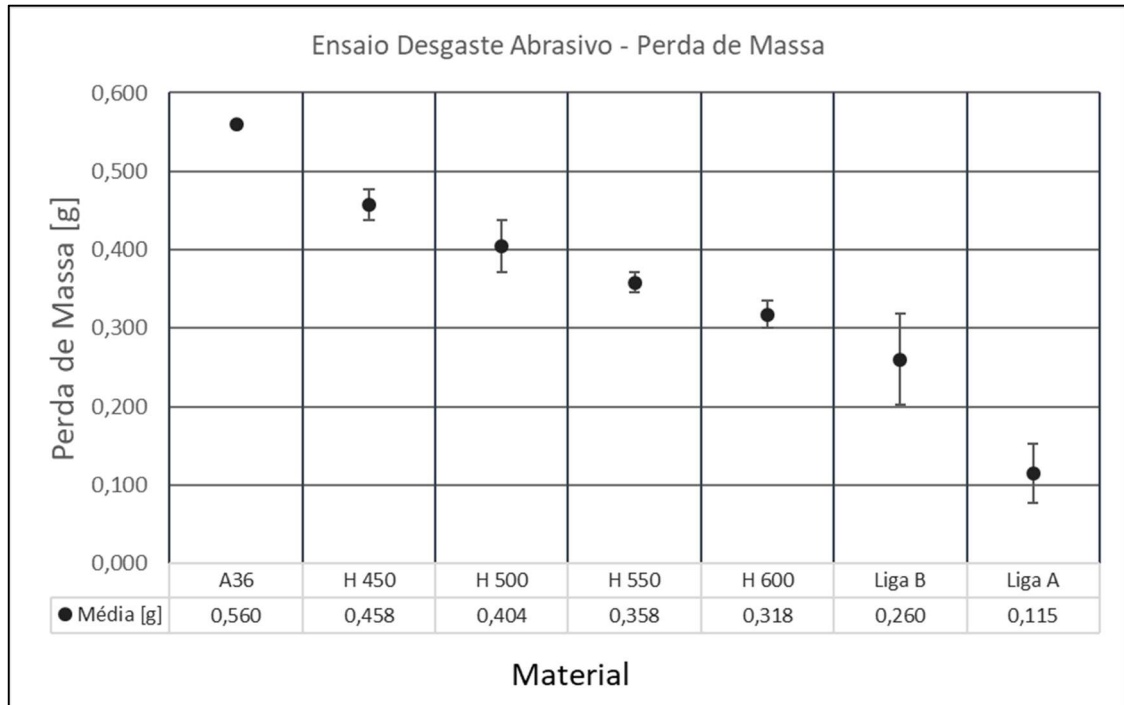


FIGURA 4.11 - Gráfico de perda de massa após ensaio de desgaste no abrasômetro de tambor. Tempo de ensaio: 90 horas.

Ensaio de Desgaste - Abrasômetro de Tambor							Data: 14/10/2017	LRSS		
Liga	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			
	Antes	Depois	Perda de Massa	Antes	Depois	Perda de Massa	Antes	Depois	Perda de Massa	
A36	83,020	82,786	0,234*	84,522	83,962	0,560	-	-	-	
450	51,361	50,886	0,475	51,428	50,966	0,462	51,064	50,628	0,436	
500	69,823	69,396	0,427	70,968	70,548	0,420	70,204	69,838	0,366	
550	83,557	83,185	0,372	83,388	83,041	0,347	84,711	84,356	0,355	
600	100,093	99,756	0,337	101,566	101,258	0,308	101,764	101,456	0,308	
Liga B	92,404	92,211	0,193	88,370	88,078	0,292	90,866	90,571	0,295	
Liga A	92,291	92,181	0,110	94,741	94,620	0,121	92,309	92,201	0,108	

* valor desconsiderado no cálculo da média devido à amostra ter se deslocado no porta amostra.

FIGURA 4.12 - Valores obtidos com a pesagem das amostras antes e depois do ensaio de desgaste para verificação da perda de massa. Unidade: grama.









Material	A-36	H600
Antes		
Depois		
Material	Liga A	Liga B
Antes		
Depois		

FIGURA 4.13 - Valores obtidos com a pesagem das amostras antes e depois do ensaio de desgaste para verificação da perda de massa.

É possível, à partir do gráfico de perda de massa apresentado, criar-se um ranking considerando a resistência a abrasão de cada material, e qual seria o mais adequado para ser utilizado em um componente na indústria que será submetido à uma condição de operação em campo que proporcione abrasão com minério de ferro. Tem-se assim a ordem de resistência a abrasão, do mais resistente ao menos resistente: Liga A; Liga B; H600; H550; H500; H450; A36.

Apesar de não ser regra, como já discutido, o resultado de perda de massa acompanhou os resultados de dureza, ou seja, quanto maiores os valores de dureza superficial do material, maior foi sua resistência à abrasão refletida na sua menor perda de massa, com exceção da Liga B. Apesar de apresentar maior dureza superficial, a Liga B apresentou maior

perda de massa que a Liga A. Verificou-se que nas amostras ensaiadas da Liga B ocorreram maiores arrancamentos de material, como pode ser observado na Figura 4.14.

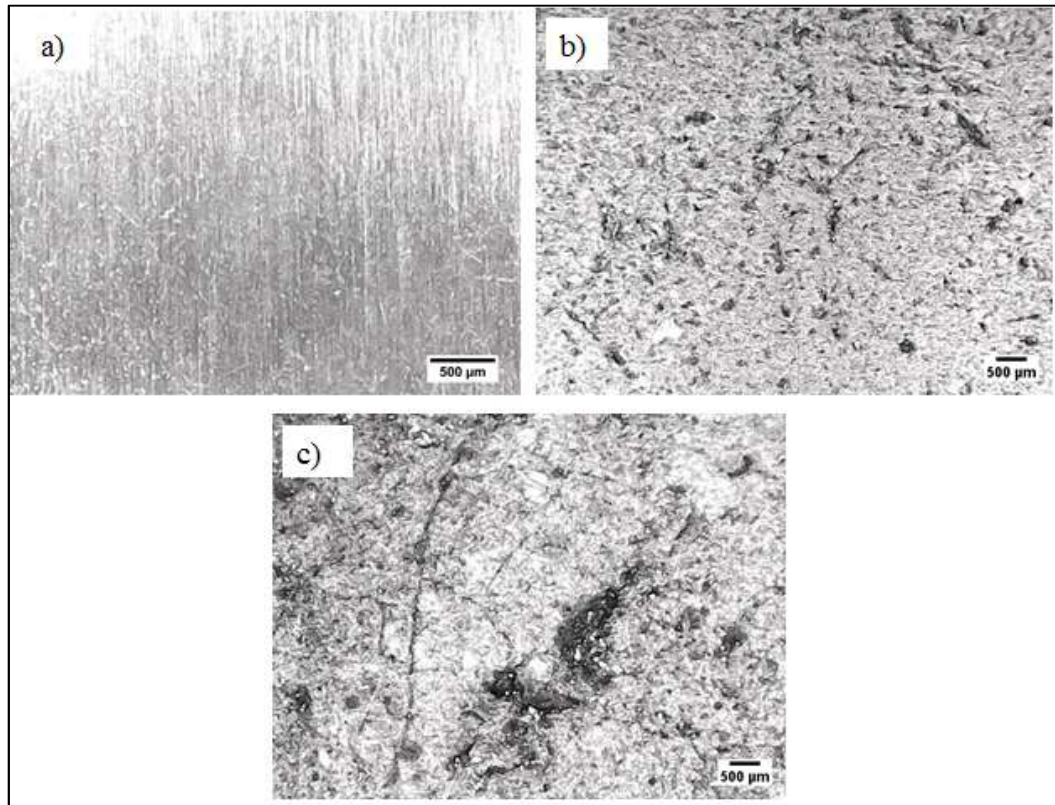


FIGURA 4.14 – a) Superfície de corpo de prova usinada antes do ensaio de desgaste. b) Marcas de desgaste na liga A. c) Marcas de desgaste na liga B.

As análises químicas e metalográficas corroboram para o resultado obtido para a perda de massa, uma vez que na classe dos Hardox®, o material H600, por apresentar uma microestrutura mais fina, apresentou uma maior dureza superficial e conseqüente melhora na resistência abrasiva. Percebe-se uma tendência bem linear entre os aços Hardox®.

Nas Ligas soldadas em relação aos Hardox® tem-se a presença de carbonetos de elevada dureza envolvidos por uma matriz também resistente, o que pode ser o diferencial para conferir uma maior resistência à abrasão.

A Liga B, apesar de conter adição de boro em relação à Liga A, apresentou um pior rendimento que a outra liga soldada para o ensaio de desgaste de tambor. É possível que essa liga tenha um comportamento diferente para ensaios de abrasão a baixa tensão como o ensaio de roda de borracha. Uma hipótese para o pior rendimento dessa liga pode ser devido à sua maior dureza, o que normalmente está associado a uma maior fragilidade. Um indicativo disso

é a maior presença de trincas de alívio de tensão nessa liga, como foram observadas no subitem 4.2.4, e que podem ter contribuído para que um mecanismo de desgaste, como o microtrincamento possa ter ocorrido. O fato do ensaio de desgaste de tambor também fornecer uma parcela de desgaste abrasivo por goivagem (impacto), associado a menor ductilidade da liga, pode ter proporcionado o maior arrancamento de material.

4.5 Abrasivo pós ensaio

Um fato interessante percebido ao término do experimento foi a constatação de um intenso desgaste sofrido pelo abrasivo (minério de ferro) utilizado no ensaio. Esse desgaste é evidente através da observação das arestas das partículas abrasivas de minério antes do ensaio e como estas ficaram arredondadas após 18 horas no interior do abrasômetro. Esse fato se repetiu para todas as cargas de minério utilizadas no ensaio. A Figura 4.15 evidencia esse fenômeno.

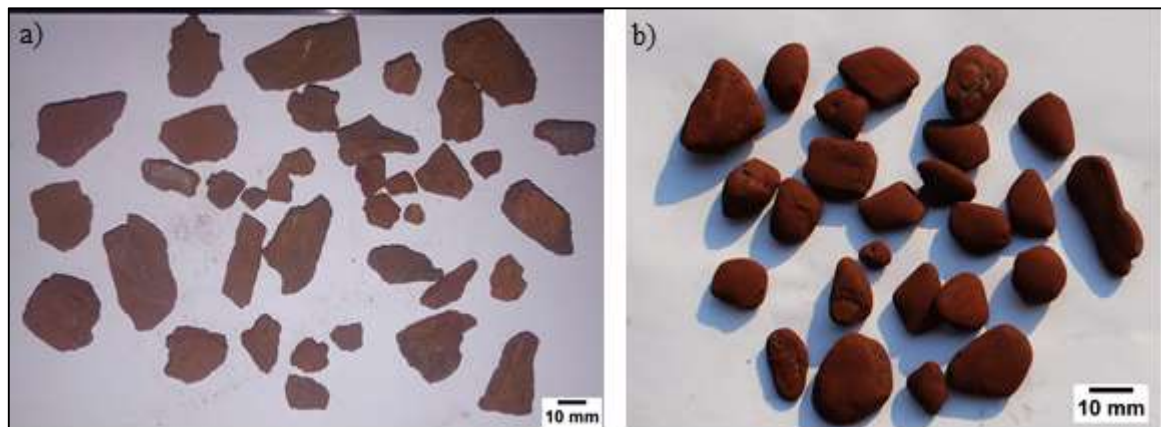


FIGURA 4.15 - Arredondamento das arestas do abrasivo após 18 horas de ensaio.

Na Figura 4.15a é apresentada a carga de abrasivo antes de ser colocada no tambor. Nessa imagem é notável as arestas características do minério. Já a Figura 4.15b apresenta esse abrasivo após o experimento, onde é notável o perfil arredondado e a ausência das “pontas” que antes havia no minério.

Esse resultado dá ainda maior importância a troca da carga abrasiva que foi utilizada neste ensaio, já que um minério com arestas arredondadas tem um poder abrasivo menor, como apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões apresentadas, neste trabalho tem-se como principais conclusões:

1. As ligas de revestimento apresentaram maiores valores de dureza e menores desgastes que os aços Hardox® no ensaio proposto.
2. Quando comparados entre si, os aços Hardox® apresentam uma tendência clara na diminuição do desgaste com o aumento da dureza.
3. A Liga B, com adição de boro, apesar de apresentar maiores valores de dureza apresentou também maior desgaste que a Liga A. É possível que justamente devido à sua maior dureza associada ao fato de ocorrer uma parcela de desgaste abrasivo por goivagem (impacto), um mecanismo de desgaste mais severo como o microtrincamento tenha sido favorecido, promovendo o maior arrancamento de material.
4. O A36 apresentou os piores resultados para a perda de massa.
5. O Ensaio com abrasômetro de tambor apesar de inovador e embrionário, apresentou resultados satisfatórios que podem ser interessantes, principalmente para aplicações industriais.
6. O minério utilizado como abrasivo sofre também muito desgaste durante o ensaio, evidenciado pelo arredondamento de suas arestas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros:

1. Repetição do ensaio variando parâmetros importantes como a rotação do tambor, carga e tipo do abrasivo, tempo entre as trocas, etc.
2. Realização de ensaio com outros tipos de materiais resistentes aos desgastes, como placas anti-desgaste revestidas comercializadas no mercado ou ainda materiais poliméricos e cerâmicos.
3. Realização de um estudo focado nos mecanismos de desgastes envolvidos neste ensaio.
4. Um estudo mais aprofundado na superfície dos corpos de prova após o ensaio, evidenciando as possíveis formas de desgaste presentes neste tipo de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEBERT, J., JUNGEDAL, M., WAARA, P. **Wear on overlay welded HCWI vs. quenched and tempered low alloyed carbon steels evaluated with granite in a laboratory drum test machine** *Wear*. v. 330-331, p. 364-370, 2015.

AMUSHAHI, M.H., ASHRAFIZADEH, F., SHAMANIAN, M. **Characterization of boride-rich hardfacing on carbon steel by arc spray and GMAW processes**. 204:2723–8. *Surf Coat Tech*, 2012.

ASTM D7625-10 **Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

ASTM G65-16e1 **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM G99-17 **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org

AWS. **Welding Handbook**. 9ª edição, v. 4, EUA, 2011.

BERLIN, J. **Analysis of Boron with Energy Dispersive X-ray Spectrometry**. *Imaging & Microscopy*, vol. 13, 19-21, May, 2011.

BLAU, P. J. **Fifty years of research on the wear of metals**. *Tribology International*, vol. 30, n. 5, p.321-331, 1997.

BOWDEN, F.P. and TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. Part 2. Clarendon Press, Oxford 1964.

BOND F. C. **Metal Wear in Crushing and Grinding**, Houston. Texas: Allis-Chalmers, Technical Press Bureau, 1963.

BORLE, S. D.; LE GALL, I.; MENDEZ, P.F. **Primary Chromium Carbide Fraction Control with Variable Polarity SAW**. Supplement, p. 1s - 7s. Welding journal, Janeiro. 2015.

COELHO, L. A. **Desgaste-Mecanismo e Revestimento Duro por Soldagem**. Dissertação apresentada ao Curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. Dezembro de 1985.

DIN 50320 **Wear Terms Systematic Analysis Of Wear Process Classification Of Wear Phenomena**. DIN Standards Committee Materials Testing, 1979.

DOWSON, D. **History of Tribology**. Longman, 1979.

EUTECTIC – CASTOLIN. **Desgaste por Abrasão**. São Paulo, 49p (apostila), 2000.

EYRE T. S. **Wear Characteristic of Metals**. Source Book on Wear Control Tecnology, ASM, Metals Park, Ohio, 1978.

FAGUNDES JÚNIOR, J. G. **Reciclagem de Cavacos para a formação de carbonetos de Titânio no metal de solda produzido por soldagem GTAW em aço-carbono**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – UNESP. Ilha Solteira, 2015.

GAHR, K. H. Z. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series, volume 10. Amsterdam: Elsevier, 1987. p.560.

GREGOLIN, J.A.R. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) resistentes ao desgaste**. Tese. Doutorado na Faculdade de Engenharia de Campinas – UNICAMP. Campinas, 1990.

HAWK, J. A., WILSON, R. D., TYLCZAK, J. H., DOGAN, Ö. N. **Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods an alloy correlation**. Wear 225–229 1031–1042, 1999.

- HENDERSON, J. L. and BULLOCH J. H. - **Alloy Classification of hardfacing Materials**. Int. J. Pres. Ves. & Piping, V-47.p.127-158 (1991).
- HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold. 1st Ed., 1992.
- JUNGEDAL, M. **Mild impact wear in a concrete mixer- An evaluation of wet abrasive wear**. KTH Material science and Engineering.Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering. 2012.
- KIM, J.H., KO, K.H., NOH, S.D., KIM, G.G., KIM, S.J. **The effect of boron on the abrasive wear behavior of austenitic Fe-based hardfacing alloys**. Wear. v. 267, p. 1415–1419, 2009.
- KOTECKI D. J. e OGBORN, J. S. **Abrasion Resistance of Iron Based Hardfacing Alloy**. Welding Journal. p. 269s – 278s. (8) Agosto, 1995.
- LEITE, R. V. **Estudo Comparativo entre Ligas Resistentes ao Desgaste Abrasivo, aplicadas por Soldagem, em chapas metálicas para fabricação de placas anti desgaste**. Dissertação apresentada ao Curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. Agosto de 2008.
- LIU, D., LIU, R., WEI, Y., MA, Y., ZHU, K. **Microstructure and wear properties of Fe–15Cr–2.5Ti–2C–xB wt.% hardfacing alloys**. Appl Surf Sci. vol. 271, p.253–259, 2013.
- MENDEZ, P. F. et al. **Welding processes for wear resistant overlays**. Journal of Manufacturing Processes, Janeiro 2014. Volume 16, p. 4-25. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>>. Acesso em: agosto 2017.
- MENON, R. **New Developments in Hardfacing Alloys**. Welding Journal, p.43-49. 1996.
- MISRA, A.; FINNIE, I. **A Classification of Three-Body Abrasive Wear and Design of New Tester**. Wear, 1970.
- MISRA, A.; FINNIE, I. **On the size effect in abrasive and erosive wear**. Wear, v. 65, n. 3, p. 359-373, 1981.

NOBLE, D. N. **The Effect of flux-cored Arc Welding Conditions on Microstructure and abrasive Wear Resistance of Two Iron-Based hardfacing Alloys.** p.1-18. The Welding Institute – Research Report, November, 1986.

PETROVIC', S.T., MARKOVIC', S.V., ZEC, S. **The effect of boron on the amount and type of carbides in chromium white irons.** Journal of Serbian Chemical Society, v.67(10), p.697–707, 2002.

PINTAÚDE, G.; ALBERTIN, E.; SINATORA, A. **A review on abrasive wear mechanisms of metallic materials.** Anais. Abrasion 2005, São Paulo, Brasil, 2005.

SILVA, P. F. **Desgaste e Fadiga Térmica de Ligas “Aço Matriz + NbC”.** Dissertação apresentada ao Curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dezembro de 2006.

SSAB. **Data sheet 2062uk Hardox® 450.** 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: setembro de 2017.

SSAB. **Data sheet 2067uk Hardox® 500.** 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: setembro de 2017.

SSAB. **Data sheet 169 Hardox® 550.** 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: setembro de 2017.

SSAB. **Data sheet 159 Hardox® 600.** 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: setembro de 2017.

SSAB. **Welding of Hardox.** v. 1, 2014. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: setembro de 2016.

STROUD, M.F. and WILMAN, H. **The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals.** Brit. J.Appl. Phys., 13. p.173-178, 1962.

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. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais - CEFET – MG. Belo Horizonte, 2016.

YÜKSEL, N., ŞAHİN, S. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe–Cr–C and Fe–Cr–C–B based hardfacing alloys. Materials & Design. v. 58, p. 491-498, 2014.