

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÉSSILY FLÁVIA DE SIQUEIRA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PARA UTILIZAÇÃO EM
FACAS PICADORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR DEPOSITADOS PELOS
PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA E ELETRODO REVESTIDO**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

JÉSSILY FLÁVIA DE SIQUEIRA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PARA UTILIZAÇÃO EM
FACAS PICADORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR DEPOSITADOS PELOS
PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA E ELETRODO REVESTIDO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S618 Siqueira, Jéssily Flávia de

Análise e comparação dos revestimentos para utilização em facas picadoras de cana-de-açúcar depositados pelos processos de aspersão térmica e eletrodo revestido / Jéssily Flávia de Siqueira. – 2018.

89 f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: João Roberto Sartori Moreno.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2018.

Bibliografia: p. 85-89.

1. Facas. 2. Cana-de-açúcar. 3. Desgaste abrasivo. 4. Aspersão térmica. 5. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Moreno, João Roberto Sartori, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecários/Documentalistas responsáveis:

Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676j



Título da Dissertação Nº 030:

“Análise e Comparação dos Revestimentos para Utilização em Facas Picadoras de Cana-De-Açúcar Depositados pelos Processos de Aspersão Térmica e Eletrodo Revestido”.

por

Jéssily Flávia De Siqueira

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA – Área de Concentração: Ciências Mecânicas, linha de pesquisa: Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 13h00 do dia 31 de agosto de 2018. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Adailton Silva Borges
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Antonio De Pádua Lima Filho
(UNESP – Câmpus Ilha Solteira)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Vagner Alexandre Rigo
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

Dedico esse trabalho a minha família e a todos que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu Deus por toda a força, graça e capacidade para realizar esse trabalho que me exigiu tanta determinação e esforço.

Agradeço o meu orientador, Professor Dr. João Roberto Sartori Moreno por ter aceitado me orientar e tornado esse trabalho ainda melhor.

A minha grande amiga e co-orientadora, Professora Ma. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio que me apresentou ao mundo das soldagens especiais e fez possível a realização desse trabalho, que esteve do meu lado a cada progresso, cada resultado e cada dificuldade, me incentivando e me apoiando em todas as circunstâncias.

Agradeço também aos meus pais Maria e Flávio por sempre cobrarem o melhor de mim e jamais terem me deixado desistir desse sonho, às minhas irmãs Jéssica e Jainy, por sempre me lembrarem da minha capacidade e da minha formação. Sou grata também ao meu namorado e amigo Diego e a toda a minha família que sempre me apoiou e acreditou em mim.

A minha grande amiga Rafaela, que me acompanhou desde a graduação e também foi fundamental na construção desse trabalho.

Ao PPGEM e a todos os professores que compõem o corpo docente pela oportunidade e conhecimentos transferidos a mim.

Sou grata a Kestra® Consumíveis de Soldagem por disponibilizar os eletrodos consumíveis utilizados no processo ER.

Ao Laboratório de Soldagem da UTFPR por disponibilizar os equipamentos, ao professor Paulo César Moselli, pela grande ajuda em algumas etapas do projeto.

Agradeço ao Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) da UFPR e ao professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes pela disponibilidade dos equipamentos em todos os processos de deposição por Aspersão Térmica e ainda, ao Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) também da UFPR – Câmpus Curitiba pela disponibilidade do microscópio ótico.

Ao Laboratório de Processos de Fabricação do IFPR – Câmpus Jacarezinho, pela disponibilidade e ao meu grande amigo e técnico responsável pelo mesmo, Fernando Sabino Fontequê Ribeiro pela ajuda indispensável e fundamental

para a execução do trabalho e pelo esforço e dedicação em fazer dar certo aquilo que parecia inviável e acima do orçamento.

Ao Laboratório de Tribologia da UDESC – Câmpus Joinville pela disponibilidade dos equipamentos, ao professor Julio Milan e ao professor Ivandro Bonetti pela grande ajuda na execução dos ensaios de desgaste.

A Central de laboratórios de Pesquisas da UNESP – Câmpus Bauru, pela disponibilidade do microscópio eletrônico de varredura.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR – Câmpus Curitiba, pela disponibilidade dos equipamentos e do microscópio eletrônico de varredura.

Sou grata a cada pessoa e cada um desses laboratórios que foram úteis e contribuíram para a realização do presente trabalho. Se não fosse a boa vontade e compromisso com a pesquisa de todos eles, a conclusão desse projeto, sem dúvida, seria impossível.

Porque, assim como descem a chuva e a neve dos céus e para lá não tornam, mas regam a terra e a fazem produzir, e brotar, e dar semente ao semeador, e pão ao que come, assim será a palavra que sair da minha boca; ela não voltará para mim vazia; antes, fará o que me apraz e prosperará naquilo para que a enviei.

Isaías, 55:10-11

RESUMO

SIQUEIRA, Jéssily Flávia de. **Análise e Comparação dos Revestimentos para Utilização em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar Depositados pelos Processos de Aspersão Térmica e Eletrodo Revestido.** 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O processo de aspersão térmica é amplamente utilizado para a aplicação de revestimentos protetores em peças e conjuntos sujeitos a ambientes corrosivos, temperaturas elevadas e também no aumento da resistência das superfícies aos mecanismos de desgaste, que é um dos problemas mais presentes e preocupantes na realidade das indústrias, nesse contexto, o nicho das indústrias sucroalcooleiras lidam diretamente com o problema do desgaste em seus componentes de preparo e extração do caldo da cana-de-açúcar. Para que a vida útil desses itens, como as facas picadoras e os martelos desfibradores, sejam prolongadas, essas indústrias utilizam em sua grande maioria, os revestimentos produzidos pelo processo de eletrodo revestido. O trabalho em questão utilizou o processo de aspersão térmica e aspersão térmica com refusão para a aplicação de revestimentos em corpos de prova confeccionados em aço SAE 1020, que atualmente, é o metal de base utilizado para a confecção de facas picadoras de cana-de-açúcar e, comparou com os revestimentos produzidos por um eletrodo comercial, utilizado em grande escala pela maioria das indústrias do ramo. Os resultados obtidos pelos ensaios de Microdureza Vickers, Desgaste por Roda de Borracha, e das análises por MO, MEV e EDS, revelaram os micromecanismos de desgaste atuante em cada um dos revestimentos estudados e, apontaram o revestimento produzido pelo eletrodo comercial o mais indicado ainda para tal finalidade. Os revestimentos produzidos por aspersão térmica refundidos também apresentaram bons resultados no ensaio de desgaste, porém, ainda serão necessários maiores estudos e aprimoramento nas técnicas de aplicação do mesmo.

Palavras-chave: Facas picadoras de cana-de-açúcar. Desgaste abrasivo. Aspersão térmica. Revestimento duro. Resistência ao Desgaste.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Jéssily Flávia de. **Analysis and Comparison of Coatings for Use in Sugarcane Chopping Knives Deposited by Thermal Spray and Welding Coated Electrode Processes.** 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The use of the thermal spraying process is widely used for the application of protective coatings in parts and assemblies subjected to corrosive environments, high temperatures and also in increasing the resistance of the surfaces to the wear mechanisms, which is one of the most present and worrying problems in the In this context, the niche of the sugar and alcohol industry deals directly with the problem of the wear and tear on its components of preparation and extraction of the sugarcane juice. In order to increase the useful life of their elements, these industries mostly use the coatings produced by the coated electrode process. The work in question used the process of thermal sprinkling and thermal sprinkling with reflux for the application of coatings in specimens made of SAE 1020 steel, which is currently the base metal used for the preparation of sugarcane chopping knives. sugar and compared with the coatings produced by a commercial electrode, used in large scale by most industries. The results obtained by the Vickers Microhardness, Rubber Wheel Wear and MO, MEV and EDS tests revealed the micromechanisms of active wear in each of the coatings studied, and pointed out the coating produced by the commercial electrode, for this purpose. The coatings produced by thermal sprinkling refounding also showed good results in the wear test, however, further studies and improvement in the application techniques will be necessary.

Keywords: Sugar cane chopping knives. Abrasive wear. Thermal spraying. Hard coating. Wear Resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.....	20
Figura 2 - Diagrama esquemático da morfologia de um revestimento aspergido.....	21
Figura 3 - Desenho esquemático do processo de aspersão térmica a chama com alimentação axial de pó (FS-Pó).	22
Figura 4 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW).....	24
Figura 5 - Soldagem ao arco tungstênio com atmosfera gasosa (GTAW).	26
Figura 6 - Representação esquemática de revestimento GTAW com utilização de pó metálico.....	27
Figura 7 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos. 28	
Figura 8 - Classificações de desgaste por abrasão: (a) abrasão de baixa tensão, (b) abrasão de alta tensão e (c) abrasão por arranque.	29
Figura 9 - Principais micromecanismos de desgaste abrasivos (a e b) microsulcamento, (c) microcorte e (d) microtrincamento.....	30
Figura 10 - Representação esquemática dos equipamentos de preparo e extração do caldo.....	32
Figura 11 - Picador de pequeno porte.....	33
Figura 12 - (a) Vista interna do picador e (b) detalhe de uma faca picadora.....	34
Figura 13 - Corpos de (a) antes do jateamento (b) depois do jateamento.	45
Figura 14 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-201.....	46
Figura 15 - Equipamento de AT a chama a pó – UFPR - LABATS.	47
Figura 16 - Pistola METCO 6P – II utilizada no revestimento das amostras.	48
Figura 17 - Mudança da morfologia em função da temperatura do substrato.	49
Figura 18 - Tartílope V2 IMC.....	51
Figura 19 - Tecimento retangular da refusão com tocha TIG.....	52
Figura 20 – Desenho esquemático da Soldagem por ER.	53
Figura 21 - Soldagem da primeira camada das amostras ER.	53
Figura 22 - Amostras embutidas: (a) Aspergida (AMAT), (b) Refundida (AMRE) e (c) Soldada (AMER).	55
Figura 23 - Microscópio Ótico.....	55
Figura 24 - MEV com EDS acoplado.....	56
Figura 25 - Microdurômetro.....	57
Figura 26 - Abrasômetro Roda de Borracha.....	59
Figura 27 – Desenho esquemático dos pontos de microdureza das amostras de AMAT.	61
Figura 28 – Microdureza da seção vertical das amostras AMAT 62	
Figura 29 – Microdureza da seção vertical das amostras AMRE..... 63	
Figura 30 – Microdureza da seção vertical das amostras AMER..... 64	
Figura 31 - Média das Microdurezas Vickers do Metal de Base e das Amostras AMAT, AMRE e AMER..... 65	
Figura 32 - Microscopia ótica do revestimento AMAT (a) 2x (b) 50x..... 67	
Figura 33 - a) Corpo de Prova de AT refundido com ampliação de 2x. b) Ampliação de 50x na camada refundida. c) Ampliação de 50x na Zona de ligação. d) Ampliação de 50x no metal de base. 69	
Figura 34 - a) Corpo de Prova Soldado com ampliação de 2x. b) Ampliação de 50x do cordão de solda. c) Ampliação de 50x na Zona de ligação. d) Ampliação de 50x da ZTA . e) Ampliação de 50x no metal de base..... 71	
Figura 35 - Pontos para identificação da composição na amostra AMAT. 72	
Figura 36 - Pontos para identificação da composição da amostra AMRE..... 74	

Figura 37 - Pontos para identificação de composição da amostra AMER.....	75
Figura 38 - Desgaste médio por processo.	78
Figura 39 - Aspecto das trilhas de desgaste para cada revestimento.....	80
Figura 40 - Microscopia das trilhas de desgaste.	81
Figura 41 - Análise via MEV das trilhas de desgaste.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos materiais para revestimento em função da composição química.....	38
Tabela 2 - Classificação dos materiais para revestimento em função do teor de elementos de liga.	39
Tabela 3 - Materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga.	41
Tabela 4 - Composição da Mistura 40Fe30Ni30WC para Revestimento.	43
Tabela 5 - Composição química do eletrodo KST EH CR 70.	44
Tabela 6 - Composição química do aço SAE 1020.	44
Tabela 7 - Parâmetros empregados no jateamento.	45
Tabela 8 - Parâmetros utilizados no processo de revestimento.	48
Tabela 9 - Parâmetros para refusão por soldagem TIG.	51
Tabela 10 - Parâmetros e especificações do fabricante.....	52
Tabela 11 - Identificação dos corpos de prova.....	54
Tabela 12 - Descrição dos elementos e parâmetros do ensaio de desgaste.	58
Tabela 13 - Rugosidade média das amostras AMAT e AMER após o jateamento. ..	60
Tabela 14 - Média e desvio padrão da microdureza medidos horizontalmente no revestimento AMAT.....	61
Tabela 15 - Composição dos pontos A, B, C e D – amostra AMAT.	73
Tabela 16 - Composição do revestimento refundido – amostra AMRE.....	74
Tabela 17 - Composição do revestimento ER – amostra AMER.....	76
Tabela 18 - Desgaste individual e média de desgaste por processo.	77

LISTA DE SIGLAS

AMAT	Amostra de Aspersão Térmica
AMER	Amostra de Soldagem por Eletrodo Revestido
AMRE	Amostra Refundidas
ASTM	American society for testing and materials
AT	Aspersão Térmica
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
DRX	Difrações de Raio-x
ER	Eletrodo Revestido
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
FS	Flame Spray
LABATS	Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais
LAMATS	Laboratório de Materiais e Superfícies
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscopia Ótica
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Aspersão Térmica (AT)	20
2.1.1 Aspersão Térmica a Chama a Pó	22
2.2 Soldagem	22
2.2.1 Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido (Smaw).....	23
2.2.1.1 Vantagens e Desvantagens do Processo em Aplicações de Revestimentos	24
2.2.2 Soldagem Ao Arco Tungstênio Com Atmosfera Gasosa (Gtaw)	25
2.2.2.1 Utilização do Processo GTAW em Revestimentos Duros	26
2.3 Desgaste	27
2.3.1 Desgaste Abrasivo	28
2.3.1.1 Micromecanismos de Desgaste Abrasivo.....	30
2.4 Preparo Da Cana-De-Açúcar	31
2.5 Facas Picadoras	32
2.6 Desgaste dos Equipamentos de Preparo da Cana	35
2.7 Soldagem de Manutenção nas Indústrias Sucroalcooleiras	35
2.8 Revestimentos Resistentes ao Desgaste Abrasivo	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Materiais	42
3.1.1 Pós para Deposição	42
3.1.2 Eletrodo Revestido	43
3.1.3 Substratos	44

3.2 Equipamentos	45
3.2.1 Jateamento.....	45
3.2.2 Rugosidade Superficial.....	46
3.2.3 Deposição Por Aspersão Térmica a Chama a Pó	46
3.2.3.1 Pré-Aquecimento.....	49
3.2.3.2 Pós-Aquecimento	50
3.2.4 Refusão.....	50
3.2.5 Eletrodo Revestido	52
3.3 Identificação Das Amostras	54
3.4 Caracterização.....	54
3.5 Análises E Ensaios	55
3.5.1 Microscopia Ótica (MO).....	55
3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS	56
3.5.3 Ensaio de Microdureza.....	57
3.5.4 Ensaio de Desgaste por Roda de Borracha	57
4 RESULTADOS.....	60
4.1 Rugosidade Média dos Substratos.....	60
4.2 Microdureza Vickers	60
4.2.1 Amostra AMAT	60
4.2.2 Amostra AMRE.....	62
4.2.3 Amostra AMER.....	63
4.2.4 Comparativo Gráfico e Percentual das Microdurezas	65
4.3 Microscopia Ótica	66
4.3.1 Microscopias Óticas dos Revestimentos	66
4.3.2.1 Aspersão Térmica	66
4.3.2.2 Aspersão Térmica Refundida	68
4.3.2.3 Eletrodo Revestido	70

4.4 Microscopia Eletrônica De Varredura E Eds Dos Revestimentos.....	72
4.4.1 Revestimento Produzido por Aspersão Térmica	72
4.4.2 Revestimento Produzido por Aspersão Térmica e Refundido	73
4.4.3 Revestimento Produzido por Soldagem com Eletrodo Revestido	75
4.5 Ensaio de Desgaste por Roda de Borracha	76
4.5.1 Análise das Trilhas de Desgaste	79
5 CONCLUSÃO	83
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

A indústria sucroalcooleira tem se destacado nos últimos anos desempenhando um importante papel para a base da economia das regiões Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste do país. Esse fato fez do Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e transformou cerca de 2% de toda terra arável em lavoura de matéria-prima para a produção de açúcar e etanol (LIMA, 2008).

Para que se faça a extração do caldo da cana e o processamento posterior do açúcar e do etanol, são necessárias diversas etapas que vão desde a colheita da planta até o produto final. Após o descarregamento, a cana é lavada e por intermédio de uma esteira direcionada para as facas picadoras, onde as mesmas são cortadas e preparadas para a próxima etapa que é o desfibramento. Esse processo tem como objetivo o aumento da densidade dessa matéria-prima para otimizar a eficiência da extração do caldo (COPERSUCAR, 2008).

Além da elevada velocidade de impacto com a cana, muitas das vezes as facas picadoras acabam por processar não somente a planta, mas também, elementos estranhos como areia, pedaços de madeira, pedras, raízes e fragmentos de aço, que acabam sendo agregados durante o processo de carregamento, ocasionando dessa forma o desgaste acentuado dos conjuntos de facas picadoras (BUCHANAN; SHIPWAY; MCCARTNEY, 2007).

A perda de material por mecanismos de desgaste nos conjuntos de facas picadoras representa um custo significativo para a operação das usinas sucroalcooleiras.

Convencionalmente, utiliza-se o processo manual de eletrodo revestido para a aplicação de revestimentos duros na superfície das facas picadoras. O trabalho em questão apresentou uma nova técnica para o revestimento desses itens, que é a Aspersão Térmica (AT). Aliado ao novo processo, uma mistura de pós foi desenvolvida de acordo com a demanda desses conjuntos e o revestimento obtido foi analisado de suas maneiras: com a utilização de refusão por soldagem TIG e sem refusão. Parâmetros para a aplicação da mistura foram estudados e um revestimento homogêneo pôde ser obtido e estudado.

1.1 Justificativa

O desgaste das facas picadoras e dos martelos desfibradores ocorre de forma progressiva, esse fato influencia na eficiência da extração da sacarose, o que leva à necessidade de realizações de paradas programadas para a substituição do item deteriorado. Durante essas paradas (que ocorrem aproximadamente uma vez ao mês), todo o processo produtivo é interrompido, onde chega-se a perder, em média, 10 horas de trabalho rentável. Além da diminuição significativa da produção é somado o envolvimento de profissionais, materiais, ferramentas e equipamentos para a recuperação e substituição do utensílio problemático (LIMA, 2008).

Para minimizar esses problemas, novas técnicas de soldagem de revestimentos estão sendo desenvolvidas, pois, a aplicação desses processos torna possível a diminuição do desgaste das peças e o aumento da vida útil desses componentes. Esse acréscimo de vida reflete diretamente na diminuição das paradas obrigatórias, aumentando assim a produtividade das usinas sucroalcooleiras.

Dentro desse cenário, o trabalho em questão buscou apresentar a atribuição de uma técnica não muito empregada para fins de revestimentos de facas picadoras de cana-de-açúcar, que é a aspersão térmica a chama a pó, e comparou com a técnica que vem sendo tradicionalmente utilizada para fins de revestimento duro nesses conjuntos, que é tradicionalmente o eletrodo revestido.

A aplicação de revestimentos por aspersão térmica poderá ser evidenciada como uma nova técnica para diminuir o problema do desgaste nas indústrias sucroalcooleiras, pois, a versatilidade com relação ao material a ser depositado é ampla e as combinações de materiais são inúmeras, podendo ser desenvolvidas misturas e ligas de acordo com a demanda e recursos específicos de cada contexto industrial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar os revestimentos depositados por aspersão térmica (AT) com e sem refusão, ambos compostos por uma mistura homogênea dos pós de ferro (Fe), níquel (Ni) e carbeto de tungstênio (WC), com o revestimento produzido pelo eletrodo **EH CR 70** (Norma. E 10 UM 65 GRZ) que é o revestimento antidesgaste tradicionalmente utilizado para fins de revestimento das facas picadoras.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral possa ser alcançado, alguns objetivos específicos deverão ser buscados, como:

- Estudar o processo de aspersão térmica a chama a pó para obter compreensão de suas particularidades, generalidades e fundamentações;
- Estudar o processo de soldagem por eletrodo revestido para obter maior compreensão e detectar suas vantagens e desvantagens para o tipo de aplicação em questão;
- Realizar uma busca e seleção de bibliografias para verificar resultados obtidos em pesquisas semelhantes;
- Escolher os parâmetros do processo de aspersão térmica, objetivando melhores propriedades para o revestimento como: dureza, resistência ao desgaste abrasivo e resistência à corrosão;
- Obter uma mistura homogênea dos pós elementares de ferro (Fe), níquel (Ni) e carbeto de tungstênio (WC);
- Realizar o processo de deposição por aspersão térmica por chama a pó;

- Refundir parte das amostras aspergidas;
- Realizar o processo de deposição por eletrodo revestido;
- Caracterizar, ensaiar e analisar as amostras;
- Comparar os resultados.

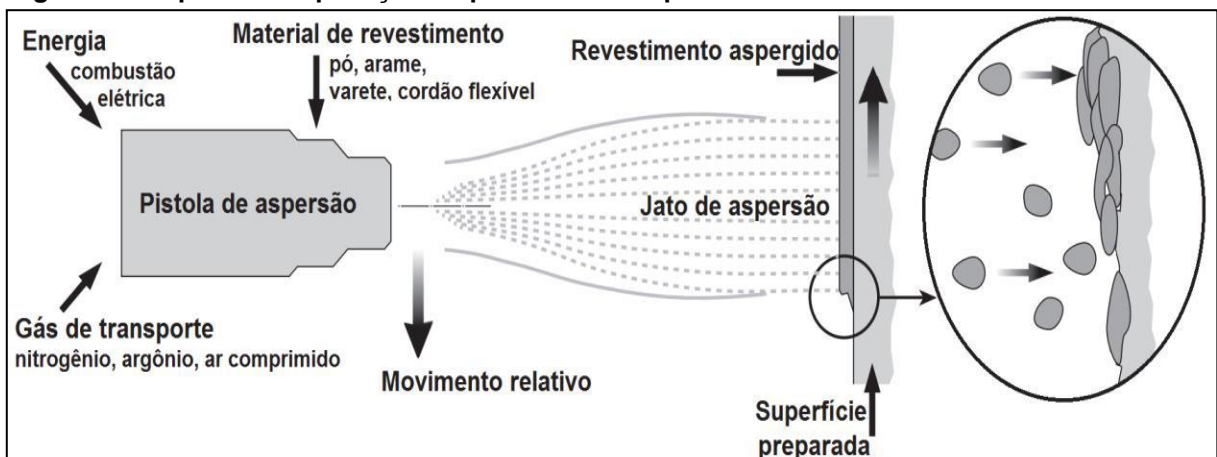
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspersão Térmica (AT)

A aplicação de revestimentos protetores é amplamente utilizada com múltiplas finalidades, como por exemplo, na proteção contra corrosão de conjuntos e componentes mecânicos, no isolamento térmico e elétrico, contra incompatibilidades químicas e biológicas, e por fim, para o aumento da resistência ao desgaste (PAREDES, 2009).

A aspersão térmica consiste em um processo no qual partículas finamente divididas do material escolhido para o revestimento são aceleradas e depositadas sobre a superfície de um substrato devidamente preparado, na condição fundida ou semi fundida, formando uma camada superficial sólida. O calor requerido pela operação é gerado na tocha de aspersão, tendo como fonte um gás combustível, a geração de um arco elétrico ou simplesmente do aquecimento do gás. As partículas aquecidas são arrastadas por um fluxo de ar comprimido, confinadas em um feixe e direcionadas para o substrato. Uma vez em contato com a superfície do substrato, as partículas se organizam em forma de lamelas e se aderem às irregularidades da superfície (rugosidades), formando um revestimento superficial. A Figura 1 apresenta um esquema do processo de revestimento por aspersão térmica (MARQUES, 2003; FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

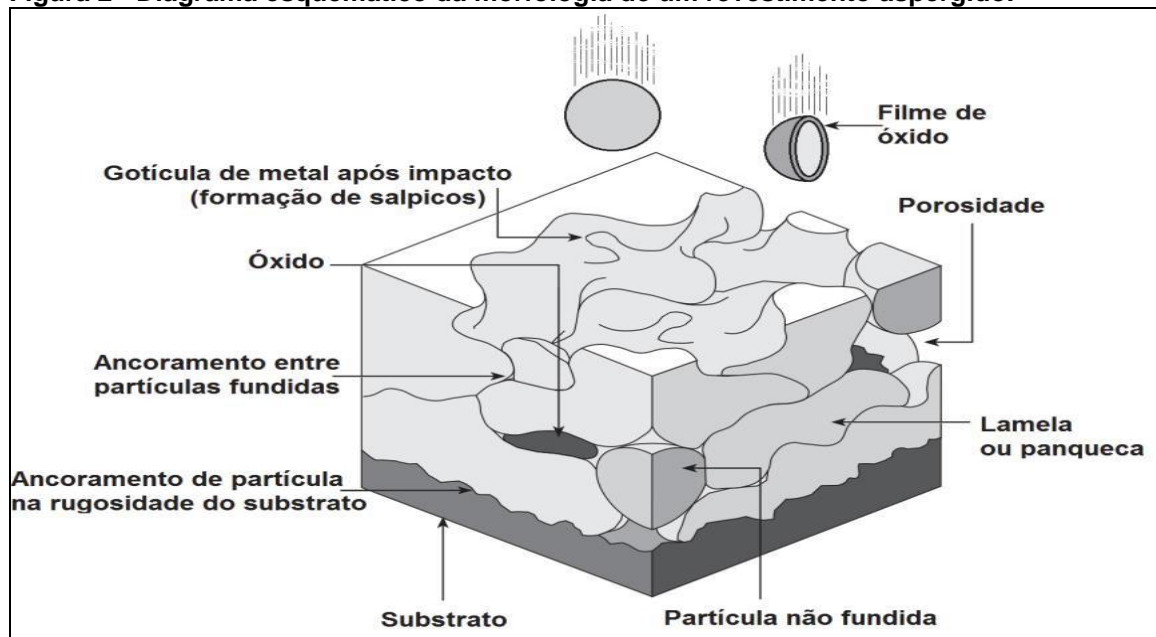
Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.



Fonte: Sucharski (2016).

Um diagrama esquemático da seção transversal de um revestimento aspergido termicamente é representado pela Figura 2, nota-se a estrutura lamelar formada pelas partículas que se ancoraram à superfície rugosa do substrato; também é possível observar a formação de poros no revestimento, a inclusão de óxidos, a ocorrência de partículas não fundidas e também a formação de salpicos (SUCHARSKI, 2016).

Figura 2 - Diagrama esquemático da morfologia de um revestimento aspergido.



Fonte: Sucharski (2016) apud Oerlikon Metco (2016).

Existem vários tipos de processos de aspersão térmica, alguns deles são: o processo de aspersão térmica HVOF (chama de elevada velocidade), o processo a arco elétrico, e o processo a chama a pó (FS), onde o presente trabalho será contextualizado. Cada um desses diferentes processos utilizam fontes de calor distintas e meios gasosos específicos para o transporte das partículas de revestimento (NASCIMENTO, MARIANO, PAREDES, 2007).

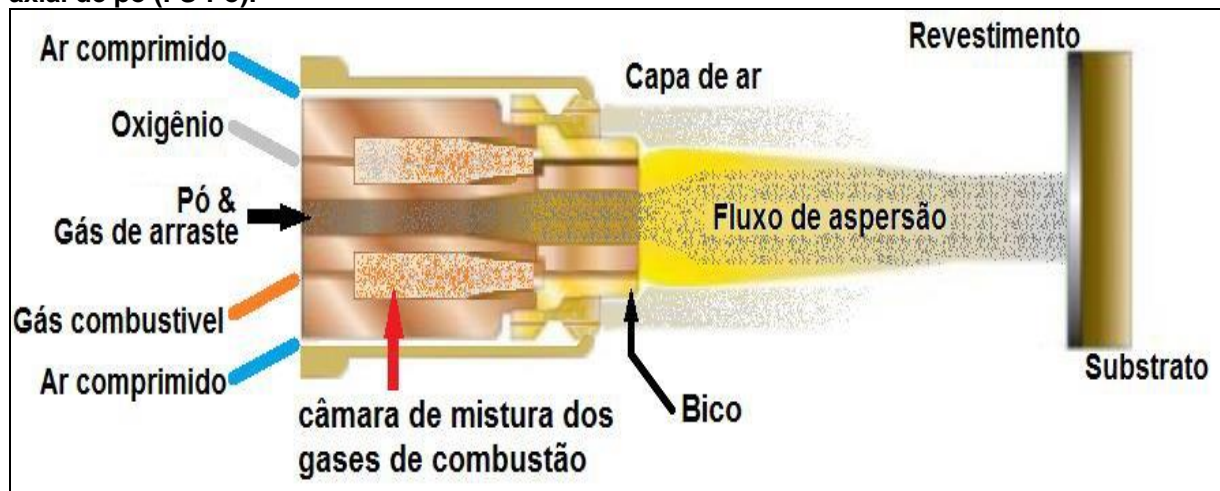
2.1.1 Aspersão Térmica a Chama a Pó

O processo chama oxiacetilênica a pó, é o mais convencional e básico de todos os processos de aspersão, onde, a alimentação dos pós na pistola pode ocorrer por um fluxo de ar comprimido ou de um gás inerte (argônio ou nitrogênio) ou ainda por intermédio da própria gravidade. Também existe o processo chama oxiacetilênica com arame, sólido ou tubular (OLÍVIO, 2012).

O processo a chama a pó foi o primeiro a ser desenvolvido, com início em 1910, permanecendo útil até os dias atuais devido ao seu baixo custo e facilidade de manuseio (MENEZES, 2007).

Esse método produz revestimentos com uma menor resistência adesiva e coesiva e maior porosidade devido às baixas velocidades alcançadas pelas partículas (TREVISANI et al. 2011). A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do processo de aspersão térmica chama a pó.

Figura 3 - Desenho esquemático do processo de aspersão térmica a chama com alimentação axial de pó (FS-Pó).



Fonte: Sucharski (2016).

2.2 Soldagem

O processo de soldagem pode ser destacado como o mais importante método para a união de metais usado industrialmente. É um processo que abrange desde a construção de itens simples e de pouca responsabilidade, até estruturas

complexas e componentes sofisticados que podem causar risco a vida humana, causar danos ao meio ambiente e gerar diversos prejuízos caso venha a falhar (MODENESI, 2008).

Existem diversas definições para o processo de soldagem que buscam justificar a união de materiais por intermédio dessa operação, entre elas:

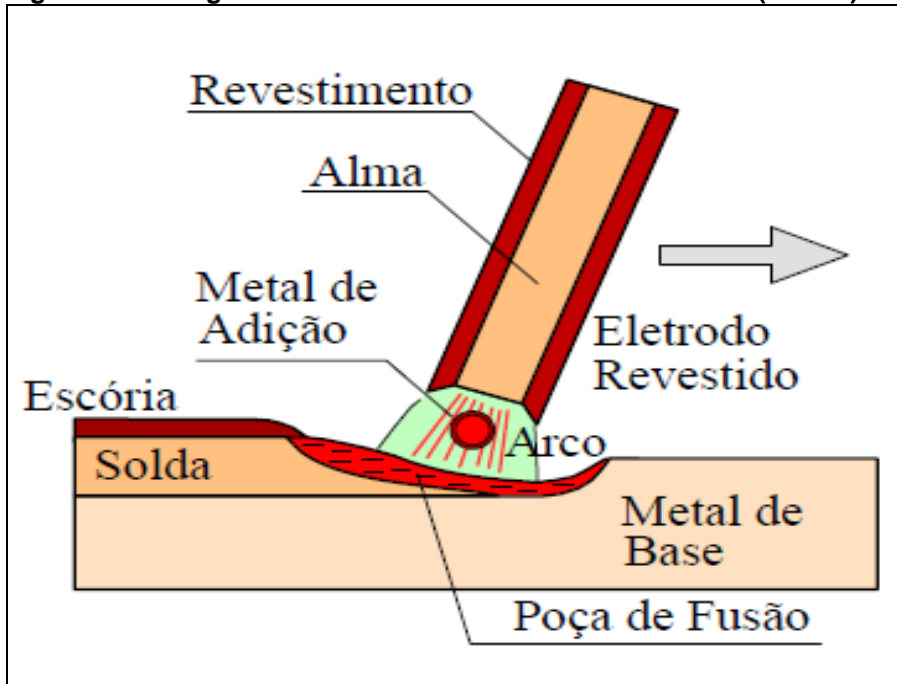
→ Processo que busca a união de duas ou mais peças, assegurando na junta soldada a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (FOGAGNOLO, 2011).

→ Operação que visa obter a coalescência localizada que é produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição (AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY *apud* FOGAGNOLO, 2011).

2.2.1 Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido (SMAW)

A soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) é um processo manual no qual o arco elétrico é produzido através da criação de uma diferença de potencial entre o eletrodo consumível e a peça. A alma do eletrodo revestido é o elemento responsável por conduzir a corrente elétrica necessária para estabelecer o arco e fornecer metal de adição que será depositado. Durante o processo de soldagem acontece a decomposição do revestimento do eletrodo, onde ocorre a formação da escória e gera gases de proteção que evita a oxidação do metal fundido durante a solidificação da poça líquida e o resfriamento do cordão de solda solidificado (FOLTRAN, 2000). Outras funções do revestimento são atribuir estabilidade ao arco elétrico e controlar a morfologia do cordão de solda (ESAB, 2005). A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

Figura 4 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW).



Fonte: Plasmac (2018).

Atualmente a soldagem com eletrodo revestido é um dos processos mais utilizados devido à sua versatilidade, baixo custo de operação e de equipamentos, bem como o uso em locais de difícil acesso (como a soldagem sobre cabeça) ou locais sujeitos à interferência atmosférica que inviabilizam a utilização de outros processos (MOSELLI, 2013).

As desvantagens do processo, quando comparado à outros que envolvem a soldagem com eletrodos consumíveis e gases de proteção são: a baixa produtividade devido ao fato de ser um processo manual, onde o soldador é o responsável por abrir e fechar o arco elétrico, os cuidados especiais no tratamento e manuseio dos eletrodos revestido, o treinamento e a habilidade do soldador, que é o principal fator responsável pela qualidade do cordão de solda, e por fim, o grande volume de gases e fumos gerados durante o processo (O'BRAIAN, 1995; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.2.1.1 Vantagens e desvantagens do Processo em aplicações de Revestimentos

As principais vantagens do processo de aplicação de revestimentos com eletrodos revestidos são listadas a seguir (DAVIS, 1993 apud FOLTRAN, 2000):

- Existe uma imensa diversidade de eletrodos disponíveis no mercado;
- O custo do equipamento para soldagem com eletrodo revestido é relativamente baixo quando comparado à outros processos para soldagem de revestimento;
- Portabilidade do equipamento;
- Possibilidade de revestir áreas de difícil acesso;
- Flexibilidade com relação às posições, podendo ser utilizado em todas elas (plana, vertical, horizontal e sobre cabeça);
- Eficiente em revestimento de chapas finas, podendo ser utilizado em metais de base com espessura a partir de 1,6 mm.

As principais desvantagens do processo de revestimento utilizando a soldagem com eletrodo revestido são (DAVIS,1993 apud FOLTRAN, 2000; MOSELLI, 2013):

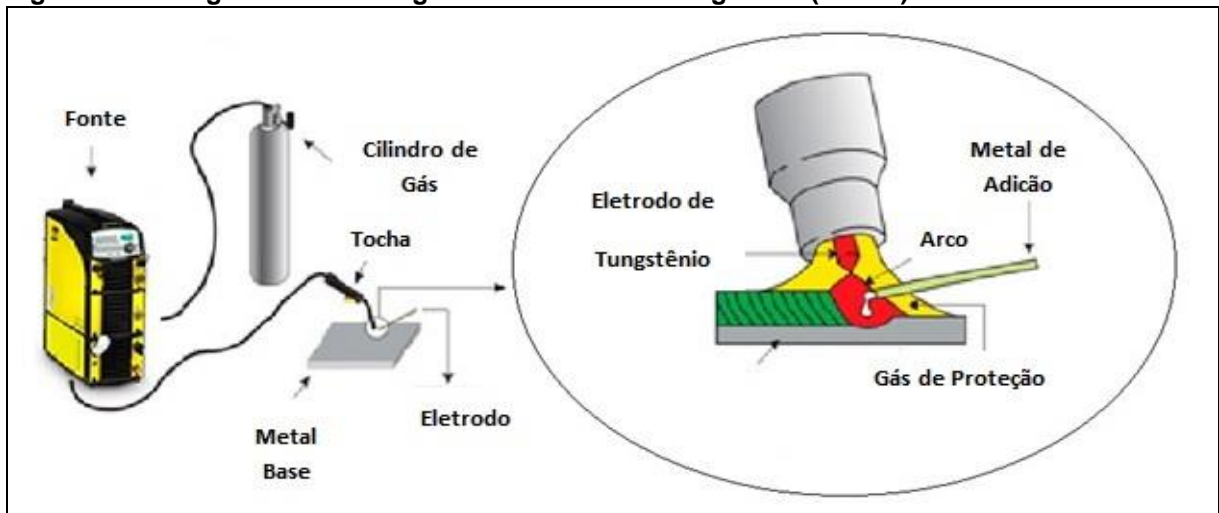
- Normalmente são necessárias duas ou mais camadas de revestimento para melhores propriedades de desgaste;
- Os eletrodos para revestimento possuem diâmetro superior, dessa forma, encarecem de habilidade de manuseio e amperagem adequada para total fundição do material de adição;
- O ciclo de soldagem (tempo necessário para consumir o eletrodo) é baixo, em média, a cada dois minutos deve-se interromper o arco, remover a escória antecedente soltando as lascas e escovando, acoplar um novo consumível ao porta eletrodo e dar continuidade ao processo;
- Devido ao rápido resfriamento do revestimento, existe a possibilidade do surgimento de tensões residuais.

2.2.2 Soldagem ao Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (GTAW)

A soldagem ao arco tungstênio com atmosfera gasosa é internacionalmente conhecida como TIG (Tungsten Inert Gas) e, recentemente por

GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). O processo utiliza como fonte de calor um arco elétrico que é mantido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e o elemento de soldagem. Todos os elementos envolvidos nesse processo (poça de fusão, eletrodo e parte do cordão) são protegidos por um fluxo gás inerte. A soldagem pode ser executada utilizando ou não metal de adição e o processo pode ser executado de forma manual ou automática (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). A soldagem GTAW produz uma solda limpa de excelente qualidade. Devido ao fato desse processo não gerar escórias, as chances de inclusões no metal de solda é anulada, e a solda não necessita de limpeza no final do processo (MOSELLI, 2013). A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do processo de soldagem GTAW.

Figura 5 - Soldagem ao arco tungstênio com atmosfera gasosa (GTAW).



Fonte: Esab (2014).

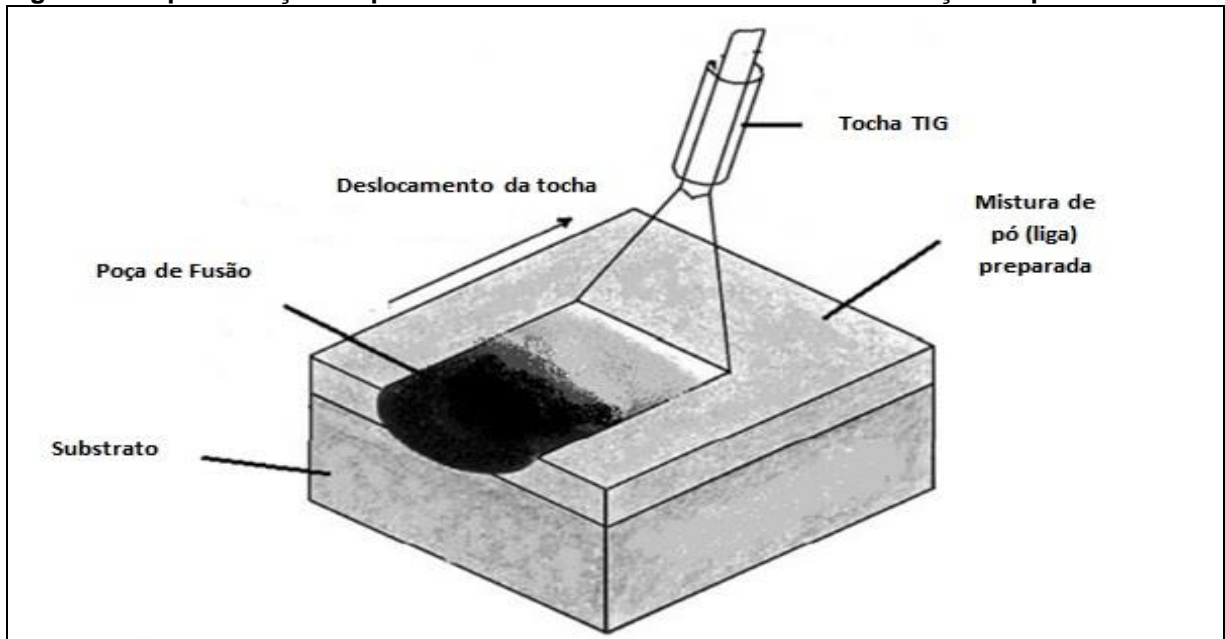
2.2.2.1 Utilização do Processo GTAW em Revestimentos Duros

Quando comparado a outros processos, a utilização do processo GTAW para aplicação de revestimentos duros apresenta-se como um método com baixa produtividade. Os metais de adição possuem composição química pré-definida pelo fabricante ou de acordo com orientações da AWS e possuem geometria na forma de vareta ou arames no caso da alimentação contínua.

Em algumas situações, utiliza-se o processo GTAW apenas como fonte de calor para fundir chapas finas ou lâminas de materiais específicos ao substrato, produzindo reações *in-situ*, entre eles. Também vem sendo utilizado como fonte de calor no método onde se prepara uma liga na forma de pó, juntamente com um

aglomerante, a liga é adicionada sobre a superfície do substrato e, posteriormente, secado e soldado (Figura 6). Este último processo se trata de um método lento que requer a realização de vários passes para a formação de camadas espessas de revestimento (MOSELLI, 2013).

Figura 6 - Representação esquemática de revestimento GTAW com utilização de pó metálico.



Fonte: Moselli (2013) *apud* Mridha, Ong e Cheand (2001).

2.3 Desgaste

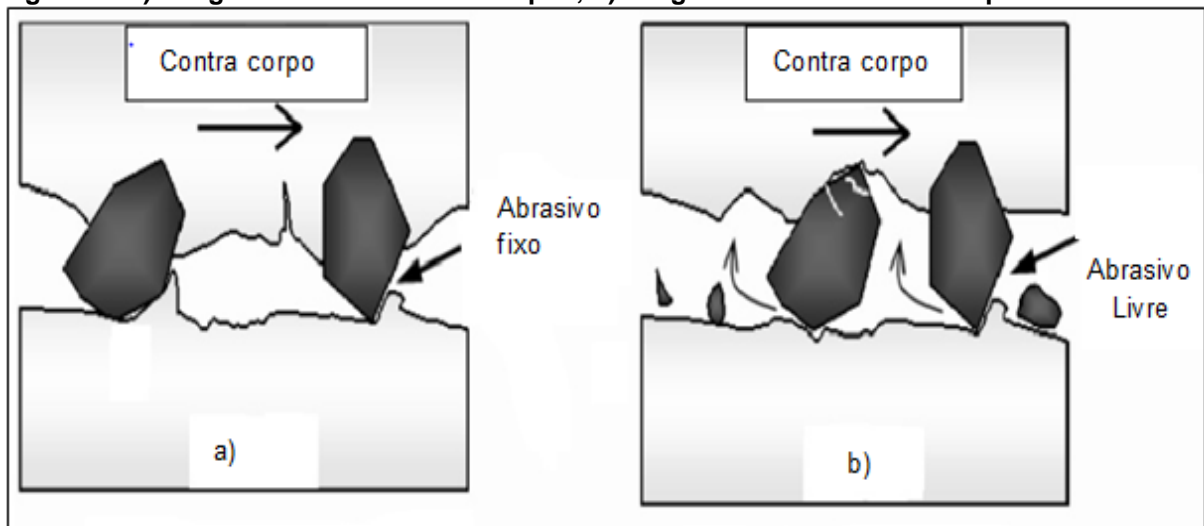
A definição de desgaste pode ser dada como uma perda progressiva de material ou o desprendimento do mesmo de uma superfície devido ao atrito de um plano sobre o outro. O desgaste não é considerado uma propriedade inerente do material, mas um sistema de resposta a uma determinada condição de trabalho. Os mecanismos podem variar gerando diversos tipos de desgastes como: desgaste por adesão, abrasão, fadiga, erosão e oxidação sendo a oxidação decorrente de fatores como a temperatura, condições de carga e superfície (BRU, 2006; BUCHELY et al., 2005). Apesar da existência dos diversos tipos de desgastes, o presente trabalho preocupa-se em definir e investigar as causas do desgaste abrasivo, que é o responsável pela degradação das facas picadoras de cana-de-açúcar (LIMA, 2008).

2.3.1 Desgaste Abrasivo

Dentre todos os diferentes tipos de desgaste já citados anteriormente, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo o mais severo e o mais presente na realidade das indústrias (KASSIM, 2000; BUCHELY et al., 2005), ele pode ser definido como um fenômeno que ocorre em uma superfície operante, onde, partículas duras provocam o deslocamento ou amassamento do material provocando assim a perda de massa da peça de trabalho (POLIDO; GALLEGO, 2006).

Quanto à forma de atuação da partícula, o desgaste abrasivo é classificado em duas categorias: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos, dependendo respectivamente se o abrasivo é fixo ou livre entre duas superfícies (HUTCHINGS, 1992). Quando as partículas ou asperidades estão rigidamente fixadas no contra corpo possibilitando riscos profundos, têm-se o desgaste de dois corpos. Um exemplo de desgaste por abrasão de dois corpos é o sistema amostra-lixa. Já no desgaste a três corpos, as partículas estão livres, esse fato permite o rolamento dessas partículas abrasivas entre a amostra e o contra corpo, atuando apenas parte do tempo no riscamento da superfície como mostra a Figura 7 a seguir.

Figura 7 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos.

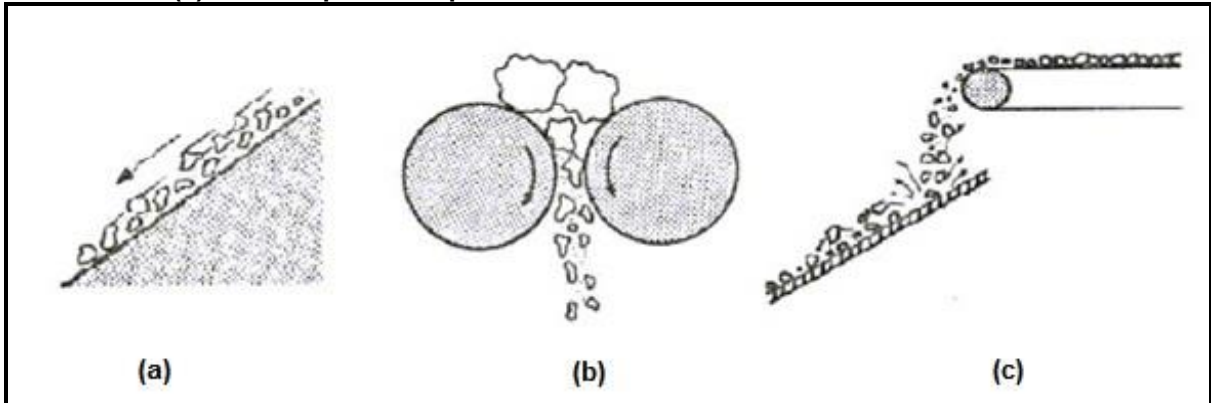


Fonte: Gates (1998).

Com relação às condições da partícula abrasiva (tamanho, angulosidade e restrição ao movimento) e aos níveis de tensão aplicada, Gates

(1998), sugeriu que a abrasão fosse classificada em três regimes: abrasão suave ou de baixa tensão, abrasão severa ou de alta tensão e abrasão extrema ou por arranque como descrito na Figura 8.

Figura 8 - Classificações de desgaste por abrasão: (a) abrasão de baixa tensão, (b) abrasão de alta tensão e (c) abrasão por arranque.



Fonte: Lima (2008) apud Eyre (1991).

→ **Abrasão de baixa tensão (suave):** Devido à ação de pequenas partículas abrasivas, o metal é desgastado gradualmente, isso produz na superfície do material um raiado ou polido, em geral, levando ao sulcamento da superfície. Esse é o tipo de abrasão que ocorre com frequência na superfície de equipamentos (50% dos fenômenos de desgaste ocasionados) que manuseiam terra, areia, minério ou carvão, como máquinas agrícolas, equipamentos de escavação, etc. Nas indústrias sucroalcooleiras, esse é o tipo de desgaste que mais provoca a deterioração de peças e equipamentos (LIMA, 2008). A figura 8(a), ilustra o desgaste abrasivo de baixa tensão.

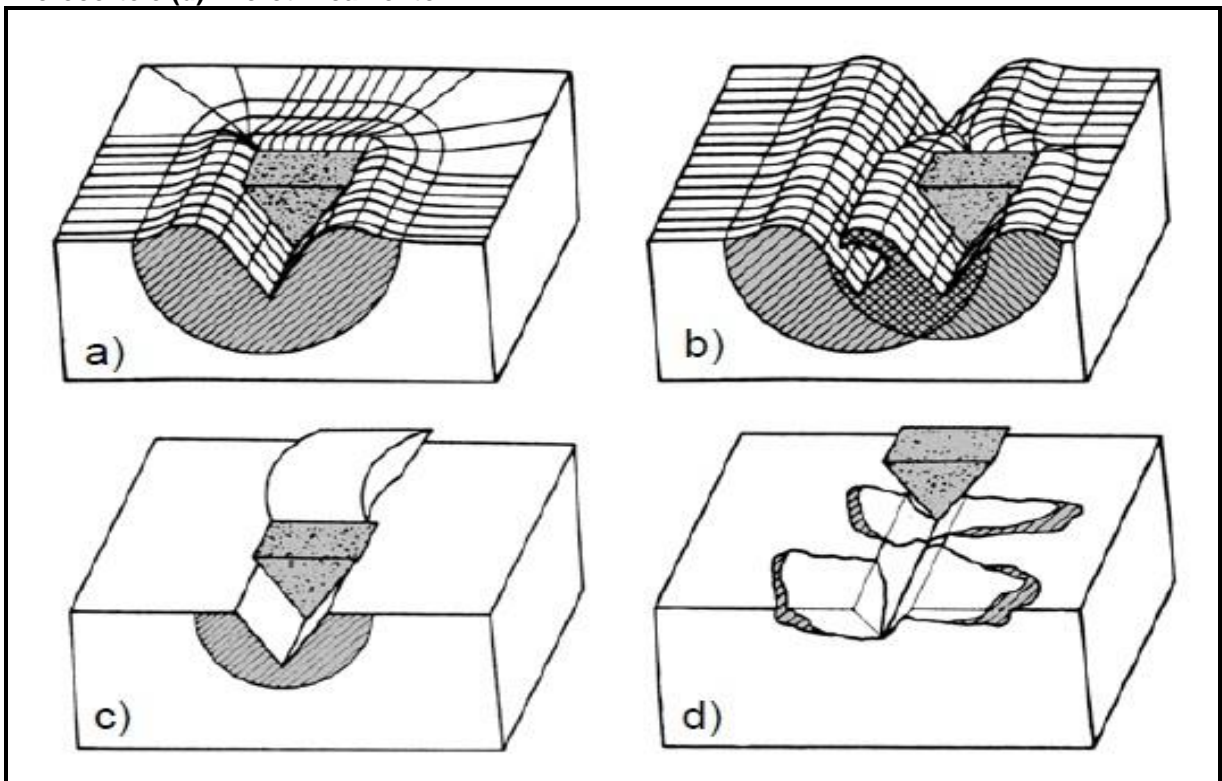
→ **Abrasão de alta tensão (severa):** Existem três elementos envolvidos, metal-abrasivo-metal (por isso é também denominado abrasão a três corpos), onde o abrasivo é forçado a penetrar entre as superfícies de dois metais. A figura 8(b) ilustra como ocorre a penetração forçada do abrasivo entre as superfícies metálicas, como no caso das moendas de cana-de-açúcar, a ação do abrasivo provoca riscamento/sulcamento e indentações sobre a superfície de trabalho. (HUTCHINGS, 1992; GATES, 1998).

→ **Abrasão por arranque (extrema):** A abrasão extrema é caracterizada pela ação do impacto que as partículas submetem à superfície do metal produzindo remoção de material. A superfície desgastada apresenta em todos os casos aspecto de raiado ou rasgado, dependendo do dano produzido. Segundo Gates (1998) e Hutchings (1992), a abrasão por arranque ilustrada na figura 8(c) é causada pela ação de rochas sobre o metal onde as deformações superficiais ocorrem em escala macroscópica.

2.3.1.1 Micromecanismos de Desgaste Abrasivo

A aparência do desgaste também pode ser utilizada para classificar o tipo de abrasão pelo qual a superfície foi solicitada. Conhecidos como os micromecanismos, esse fatores são classificados em três categorias: (a e b) microsulcamento, (c) microcorte e (d) microtrincamento, ilustrados na Figura 9 (BUCHELY et al, 2005).

Figura 9 - Principais micromecanismos de desgaste abrasivos (a e b) microsulcamento, (c) microcorte e (d) microtrincamento.



Fonte: Lima (2008) apud Zum Gahr (1998).

No microsulcamento, inúmeras partículas agem simultaneamente e sucessivamente, provocando o amassamento na superfície e formando saliências. Durante a primeira etapa do microsulcamento (Figura 9 (a)) não há perda efetiva de material, entretanto, a ação simultânea das partículas abrasivas, podem levar a perda de material, como mostra a Figura 9 (b) (HUTCHINGS, 1992; STACHOWIAK, 2001).

Quando as condições de desgaste sofrido, não permitem a ocorrência de grandes níveis de deformação plástica do material, ocorrerá o mecanismo chamado microcorte ou microrriscação, ilustrado na Figura 9 (c). Nesse caso, a perda de material ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo (LIMA, 2008).

O microtrincamento ocorre em materiais duros quando altos níveis de tensão são impostos pela partícula abrasiva (Figura 9 (d)). Esses mecanismos são típicos de condições frágeis de desgaste, onde, a interação partícula/superfície leva ao destacamento de grandes fragmentos de material, muitas vezes maiores do que as dimensões do próprio risco devido à propagação das trincas durante a solitação das partículas (HUTCHINGS, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

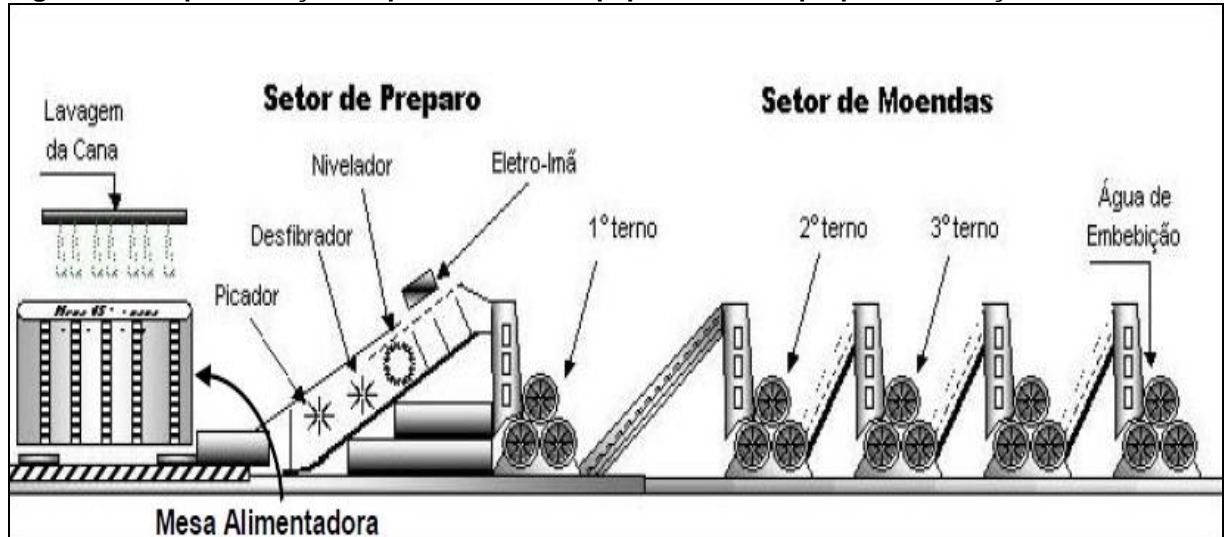
2.4 Preparo da Cana-de-Açúcar

Para que se faça a extração do caldo da cana e posterior processamento para a produção de açúcar ou álcool, são necessárias diversas etapas e equipamentos. O primeiro processo pelo qual essa matéria-prima é submetida é a lavagem para a retirada de terra e excessos de elementos estranhos (madeira, raízes, areia, por exemplo). Após a lavagem, por intermédio de uma esteira alimentadora, a cana-de-açúcar é direcionada para o setor de preparo (nivelador, picador e desfibrador) e posteriormente para as moendas (COPERSUCAR, 2017). A Figura 10 ilustra a representação esquemática dos equipamentos envolvidos no preparo e extração do caldo.

O preparo da cana para moagem visa basicamente o rompimento das paredes duras da cana (casca e nós). Essa desintegração aumenta a densidade do “colchão de cana” e favorece a capacidade de extração do caldo. Esses procedimentos facilitam o trabalho da moenda, reduzindo as perdas de sacarose no bagaço. Quanto mais eficiente for o preparo da cana, maior quantidade de caldo

será extraído dessa matéria-prima. Assim, os equipamentos de preparo operam com altas velocidades e baixa pressão sem, no entanto, extrair caldo (NOGUEIRA; FILHO, 2005).

Figura 10 - Representação esquemática dos equipamentos de preparo e extração do caldo.



Fonte: Copersucar, 2017.

2.5 Facas Picadoras

As facas picadoras ou picador é um conjunto que prepara a cana-de-açúcar para ser enviada ao desfibrador. O equipamento gira em torno de um eixo rotativo e tem como objetivo aumentar a densidade do colchão de cana, fragmentando-as em pedaços menores para facilitar o trabalho do desfibrador como mostra a Figura 11 (COPERSUCAR, 2017).

Figura 11 - Picador de pequeno porte.

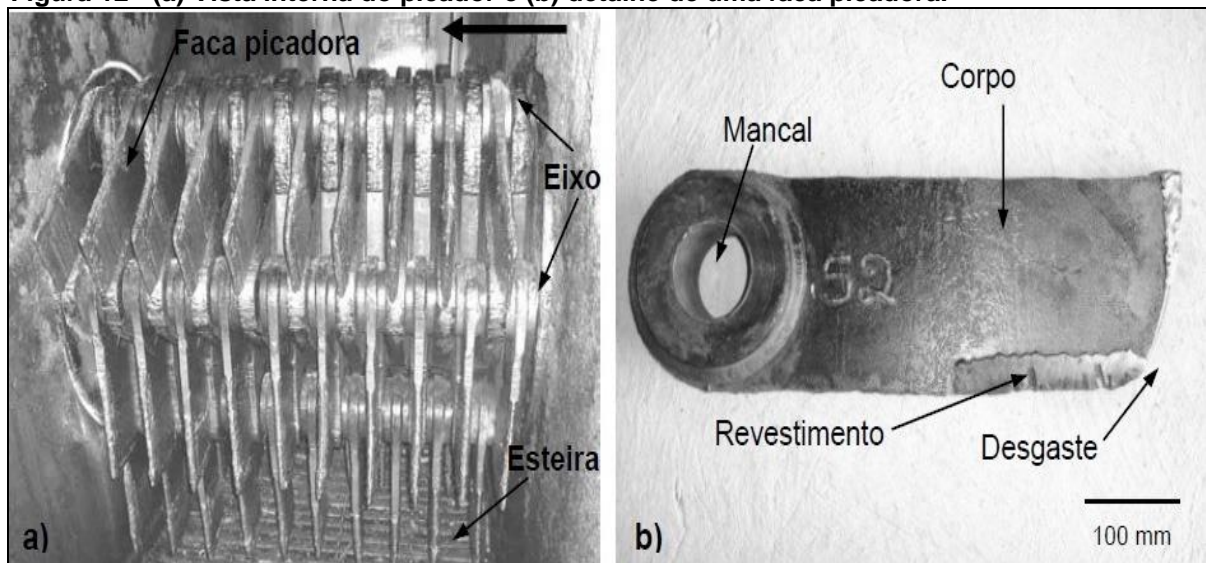


Fonte: Doce Brasil, 2015.

A quantidade de facas instaladas no picador depende diretamente da demanda específica da usina. O picador mostrado na Figura 12 é de pequeno porte e está instalado em uma usina de processamento de cana-de-açúcar que produz e comercializa somente açúcar mascavo (DOCE BRASIL, 2015).

Os conjuntos picadores são constituídos por facas confeccionadas em lâminas de aço carbono que são revestidas com solda dura, o que melhora o desempenho dessas facas na execução do trabalho de preparo da cana (RIBEIRO, BLUMER; HORII, 1999). A Figura 12 (a) apresenta a vista interna de um picador de porte médio, constituído de seis eixos e dez facas por eixo, na parte inferior da figura, destaca-se a esteira que arrasta a cana contra o picador, acima da parte superior dos eixos rotativos a seta indica a região de entrada da cana. A Figura 12(b) apresenta o detalhe de uma faca picadora confeccionada em aço carbono ABNT 1020 após um ciclo de trabalho.

Figura 12 - (a) Vista interna do picador e (b) detalhe de uma faca picadora.



Fonte: Lima, 2008.

Dentre os equipamentos de preparo, os conjuntos de facas são as primeiras ferramentas a entrarem em contato com a cana-de-açúcar, seguidas pelos martelos desfibradores e posteriormente as moendas. Teoricamente, essas facas deveriam ser confeccionadas em aços com alta resistência ao desgaste e com boa resistência mecânica, como por exemplo os aços liga Cr-W-V, com um resistência máxima à tração de 2100 MPa e dureza do bisel de 57 HRC a 58 HRC. Entretanto, visando a redução dos custos, as mesmas são fabricadas utilizando aços de baixo carbono com resistência máxima à tração de 380 MPa, obtendo-se a dureza do fio de corte utilizando eletrodos de alta resistência e dureza (LIMA, 2008).

Segundo Espinosa et al. 2004 apud Lima (2008), a fadiga é uma importante causa de falha de facas picadoras, ocorrendo devido ao trabalho de picagem; esse problema se intensifica ainda mais quando as mesmas são construídas em aços de baixo carbono e baixa resistência. Além do desgaste ocasionado pela elevada velocidade de impacto com a cana-de-açúcar, também se soma o desgaste abrasivo quando a faca entra em contato com elementos agressivos como areia, pedaços de madeira, raízes, pedras e fragmentos de aço que são agregados à matéria-prima durante o processo de carregamento.

2.6 Desgaste dos Equipamentos de Preparo da Cana

A produtividade das usinas e a elevação dos custos de produção são fatores diretamente afetados pelo desgaste dos equipamentos. Durante o processo produtivo, os rolos de moendas fabricados em ferro fundido, sofrem elevado desgaste que acabam por provocar a parada das máquinas. O desgaste nas moendas é provocado por deslizamento de materiais na superfície dos rolos como, refugos, areia, o próprio bagaço, bem como pela corrosão provocada pelo próprio caldo da cana (BUCHANAN; SHIPWAY; MCCARTNEY, 2007).

Utilizando a soldagem de revestimento com ligas especiais é possível atingir um aumento na durabilidade do rolo em serviço de até 300% (PRISCO, 1993). Até a década de 70, as usinas utilizavam rolos de ferro fundido ou SAE 1045, os quais duravam em média metade da safra, exigindo a parada do equipamento para a substituição da moenda e a recuperação da peça desgastada. Atualmente, com o desenvolvimento de novas ligas, os rolos revestidos operam continuamente por todo o período da safra (sete meses, aproximadamente) (LIMA, 2008).

Na unidade de preparo (recebimento, corte e desfibrção) o desgaste é de natureza mecânica e existem diversos parâmetros que contribuem para o desgaste das peças, como: tipo do solo, tipo de colheita, eficiência de lavagem e qualidade da planta (PRISCO, 1993; SANTOS et al, 2005). Dentre esses equipamentos, as facas picadoras e os martelos desfibradores são os primeiros a entrarem em contato com a cana-de-açúcar. Devido ao atrito desses equipamentos com a casca da cana e com os elementos agregados a carga (madeira, pedras, areia, etc.) aliados a alta velocidade de impacto (1200RPM), esses equipamentos acabam por sofrer um severo desgaste abrasivo. Devido ao fato de esses componentes serem fabricados em aço de baixo carbono, é fundamental a utilização de soldagem de revestimento para conceder aos mesmos resistência ao desgaste (PRISCO, 1993; SANTOS et al, 2005).

2.7 Soldagem de Manutenção nas Indústrias Sucroalcooleiras

Durante o período da entre safra (cinco meses, aproximadamente), as usinas sucroalcooleiras desmontam todos os equipamentos e realizam a manutenção geral

de todos os conjuntos. Dentre esses equipamentos, 70% são recuperados por soldagem através de diferentes procedimentos. Assim, a soldagem de manutenção corretiva é realizada após a peça ter sido retirada do trabalho em virtude do desgaste sofrido. Já na soldagem de manutenção preventiva, é aplicada na superfície da peça ainda em trabalho, um revestimento duro com características e propriedades eficientes ao desgaste superiores às do metal de base. (PRISCO, 1993; SANTOS et al, 2005).

A soldagem tem desempenhado importante papel na fabricação e manutenção em todos os seguimentos industriais, inclusive, nas usinas sucroalcooleiras. Os equipamentos envolvidos nas etapas iniciais do processo de extração do caldo de cana (facas picadoras e martelos desfibradores) são frequentemente fabricados e recuperados por meio dos processos de soldagem. Dessa forma, a soldagem ocupou uma importante função dentro do contexto das indústrias sucroalcooleiras, o de aumentar a vida útil de seus componentes (PARANHOS, 2003).

O uso da soldagem se estende a diversos outros equipamentos do setor sucroalcooleiro, como: eixos, engrenagens, bagaceiras e tubulações. A tecnologia de soldagem evoluiu de tal forma, que por intermédio de ligas especiais desenvolvidas com propriedades eficientes contra o desgaste abrasivo, a vida útil pôde ser aumentada em até 10 vezes com relação ao metal de base ou substrato (geralmente aço ou ferro fundido) sem esses revestimentos. Entretanto, as facas picadoras e os martelos desfibradores ainda são considerados os “gargalos” das indústrias, pois, em função do severo desgaste sofrido, forçam a realização de paradas mensais para a realização de manutenção ou até mesmo substituição (PRISCO, 1993; SANTOS et al, 2005).

Apesar de alguns dados encontrados na literatura sobre a aplicação de revestimentos em rolos de moendas, pouco se encontra sobre facas picadoras e martelos desfibradores. Em geral, os dados técnicos ficam restritos as empresas que prestam serviços de manutenção ao setor, ou mesmo em posse de cada unidade sucroalcooleira, as quais desenvolvem técnicas que condizem com suas demandas específicas (LIMA, 2008).

2.8 Revestimentos Resistentes ao Desgaste Abrasivo

Dureza e resistência ao desgaste são duas propriedades que costumam ser relacionadas, todavia, Lima (2008) afirma que não é necessariamente a dureza, mas a microestrutura que administra diretamente as propriedades de resistência ao desgaste.

Embora o aumento da dureza possa, muitas das vezes otimizar a resistência ao desgaste, quando se trata especificamente de revestimentos aplicados sobre substratos de aço de baixo e médio carbono, diferentes revestimentos com dureza similar podem apresentar resistências distintas sobre os valores de desgaste abrasivo (KOTECKI; OGLORN, 1995; LIU et al, 2015).

A alta demanda por revestimentos que atendam às mais diversas solicitações no campo tem resultado em uma enorme variedade de ligas. A classificação dessas ligas pode ser baseada em propriedades como dureza e resistência mecânica e também em fatores como composição e comportamento da liga em testes de condições específicas de serviço. As principais condições para a seleção de uma liga para revestimento são primeiramente ordenadas pelo tipo de desgaste que o componente de trabalho será exposto e solicitado e, finalmente pelos custos envolvidos no contexto. É importante também considerar o metal de base que irá receber o revestimento em questão, o processo de deposição do revestimento, a resistência ao impacto, a temperatura de trabalho do componente revestido e os fatores que podem influenciar a corrosão. (ZIEDAS; TATINI, 1997; LIU et al, 2015).

A Tabela 1 indica cinco tipos de classificações de materiais para revestimento em função da composição química.

Tabela 1 - Classificação dos materiais para revestimento em função da composição química.

Composição	
Classe 1	Aços ligados com 2% a 12% de elementos de liga
Classe 2	Aços alta liga, incluindo os aços rápidos e aços ao manganês
Classe 3	Ligas à base de ferro com 25 a 50 % de elementos da liga
Classe 4	Ligas à base de cobalto, níquel e níquel-cromo
Classe 5	Ligas com dispersões de carboneto de tungstênio, entre 38 a 60% em matriz de liga dúctil

Fonte: Moselli (2013) adaptado de Wainer; Brandi; Mello (1992) .

A escolha de uma liga específica também dependerá de fatores característicos como: o tipo de desgaste que atua sobre a peça de trabalho, das condições superficiais, da compatibilidade metalúrgica e do tipo de processo escolhido para a aplicação do revestimento (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; FANICCHIA et al, 2017).

A Tabela 2 apresenta outra classificação dos materiais para revestimentos separados em cinco grandes classes, divididos em função da quantidade de elementos de liga (além do ferro). De acordo com Baptista; Nascimento (2009), na Tabela 2 a resistência ao desgaste e o custo de cada classe aumentam com o número do grupo.

Tabela 2 - Classificação dos materiais para revestimento em função do teor de elementos de liga.

Teor total de elementos de liga (%)	Elementos de liga principais
Grupo 1 - Materiais ferrosos de baixa e média liga	
1A 2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B 6 a 12	
Grupo 2 - Materiais ferrosos de alta liga	
2A 12 a 15	Cr, Mo
2B 12 a 25	Mo, Cr
2C 12 a 25	Mn, Ni
2D 30 a 37	Mn, Cr, Ni
Grupo 3 – 25% - 50% de elementos de liga	
3A 25 a 50	Cr, Ni, Mo
3B 25 a 50	Cr, Mo
3C 25 a 50	Co, Cr
Grupo 4 - Ligas à base de níquel e à base de cobalto	
4A 50 a 100	Co, Cr, W
4B 50 a 100	Ni, Cr, Mo
4C 50 a 100	Cr, Ni, Mo
Grupo 5 - Carbonetos	
5 75 a 96	WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz Metálica

Fonte: Moselli (2013) adaptado de Baptista, Nascimento (2009).

As ligas dos subgrupos 2A e 2B são mais resistentes ao desgaste, menos tenazes e mais caras que os materiais do grupo 1. Já os subgrupos 2C e 2D são muito tenazes, porém apresentam limitada resistência ao desgaste, que pode ser aumentada pelo encruamento. As ligas do subgrupo 2D possuem um teor total de elementos de liga entre 30% e 37%, variando o carbono entre 0,10% e 1%. Os materiais de grupo 3 apresentam 25% a 50% de elementos de liga, são ligas com alto cromo, várias delas com níquel e/ou molibdênio. Os teores de carbono no grupo

3 variam entre 1,75% a 5%. Este grupo é caracterizado pela presença maciça de carbonetos hipereutéticos, que conferem às ligas uma alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor. São ligas mais caras que as dos grupos 1 e 2 (BAPTISTA, NASCIMENTO, 2009; HARSHA; DWIVEDI; AGRAWAL, 2006).

O grupo 4 compreende as ligas à base de cobalto e à base de níquel com teor total de elementos não ferrosos entre 50% e 99%. As ligas à base de cobalto, subgrupo 4A, são consideradas como os mais versáteis materiais de revestimento duro, resistem ao calor, à abrasão, à corrosão, ao impacto, à descamação, à oxidação, ao choque térmico, à erosão e ao desgaste metal-metal. Algumas destas ligas mantêm uma dureza elevada até 825°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem 1100°C. As ligas à base de níquel, subgrupo 4B, são especialmente indicadas para peças sujeitas ao mesmo tempo à corrosão e ao desgaste. São superiores a outros materiais de revestimento duro em aplicações nas quais o desgaste é causado pelo contato metal-metal, como no caso de mancais. Estas ligas mantêm durezas elevadas até cerca 650°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem de 875°C (MOSELLI, 2013; SAYMAN et al, 2008).

Os materiais do grupo 5 consistem de grânulos duros de carbonetos distribuídos em uma matriz metálica. São muito indicados para aplicações de abrasão intensa e de corte. Inicialmente se empregavam apenas os carbonetos de tungstênio. Recentemente, outros carbonetos, principalmente titânio, tântalo e cromo, passaram a ser usados com bons resultados. Como matriz metálica, vários materiais têm sido utilizados, tais como ferro, aço-carbono, ligas à base de níquel, à base de cobalto e bronzes. Os materiais do grupo 5 possuem a máxima resistência à abrasão em peças sujeitas a impactos pequenos ou moderados (BAPTISTA, NASCIMENTO, 2009; SAYMAN et al, 2008).

Uma classificação dividindo os materiais para revestimento em 4 categorias é apresentada por Pradeep; Ramesh; Prasad (2010). A divisão utiliza os mesmos critérios das tabelas anteriores (Tabela 1 e Tabela 2) que é a porcentagem de elementos de liga na composição química. A Tabela 3 apresenta essa divisão discriminando em alguns casos suas aplicações.

Tabela 3 - Materiais para revestimento duro, em função do teor de elementos de liga.

Categoria	Teor total de elementos de liga (%)
Materiais ferrosos de baixa e média liga	Até 12% de elementos de liga Cr, Mo e Mn
Materiais ferrosos de alta liga	De 12 a 50% de elementos de liga adicionados ao Cr sempre presente nas ligas utilizadas para revestimento duro. Dentre as ligas pode-se citar Ni e Co
Ligas a base de níquel a base de cobalto	Apresenta quantidades relativamente pequenas de ferro (1,3 a 12,5%) variando a quantidade de Cr e W. Apresenta elevada resistência a oxidação, baixo coeficiente de atrito. Aplicadas em condições de elevadas temperaturas – em torno de 500° ou mais
Ligas a base de carbonetos de tungstênio	Considerados um dos materiais mais duros disponíveis para uso industrial com aplicações em revestimento duro.

Fonte: Moselli (2013) adaptado de Pradeep; Ramesh; Prasad (2010).

Comparando as Tabelas 1, 2 e 3 é possível constatar que as divisões são as mesmas. Com relação à quantidade de elementos de liga, a Tabela 2 mostra-se mais esclarecedora, onde é possível analisar melhor a demanda de aplicação e os processos disponíveis para uma seleção mais adequada da liga para uma determinada aplicação (MOSELLI, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como direção, comparar revestimentos obtidos por dois processos de soldagem distintos, sendo eles, aspersão térmica (AT) e soldagem por eletrodo revestido (ER). Para o primeiro processo, foram feitas deposições de três camadas da mistura preparada com 40% de pó de ferro, 30% de pó de níquel e 30% de pó de carbeto de tungstênio, todos os pós possuindo granulometria entre 45 e 180 μm .

Metade das amostras aspergidas foram submetidas a um processo de refusão utilizando chama produzida a partir de uma pistola de soldagem TIG.

Para o segundo processo de soldagem (ER), foram depositadas duas camadas de revestimento compostas por cinco cordões, utilizando o eletrodo KST EH CR 70.

Os revestimentos obtidos pela mistura de pós 40Fe30Ni30WC e o revestimento obtido pelo eletrodo KST EH CR 70 foram depositados em corpos de prova confeccionados em aço carbono 1020 com as superfícies devidamente preparadas e possuindo as mesmas dimensões.

Os resultados das análises e ensaios realizados nos corpos de prova do processo AT e AT refundida foram comparados com os resultados obtidos nos corpos de prova revestidos pelo processo de soldagem ER.

3.1 Materiais

3.1.1 Pós para Deposição

A base da mistura foi o pó de Ferro; essa escolha baseou-se primeiramente no fato de que o eletrodo KST EH CR 70 também possui base de ferro, assim, a resistência ao desgaste é atribuída devido à microestrutura de carbonetos duros (WC) em uma matriz relativamente macia. Além de assemelhar-se com a composição do eletrodo, o Ferro, aumenta a compatibilidade metalúrgica com o metal de base, além de possuir custo relativamente baixo e fácil aplicação. A

presença do Níquel na mistura foi adicionada com o objetivo de conferir propriedades como resistência mecânica e resistência a corrosão (DESHPANDEA; SAMPATHA; ZHANG, 2006; CARCELLER, 2007; BREZINA,1980). Finalmente o Carbetto de Tungstênio foi acrescentado à liga devido à combinação de dureza e tenacidade que esse elemento possui (BUCHELY et al, 2005). Os pós apresentaram uma granulometria entre 45 e 180 μm .

Após o dimensionamento da mistura, os pós foram misturados manualmente e colocados em uma estufa por cerca de 3 horas a 120° para serem secos. Após a primeira secagem, os pós foram colocados em um misturador tipo Y e rotacionados em um torno mecânico a 50 rpm por 2 horas, depois colocados novamente em uma estufa por cerca de 24 horas. A Tabela 4 apresenta a composição da mistura e seus respectivos valores percentuais de cada elemento da composição.

Tabela 4 - Composição da Mistura 40Fe30Ni30WC para Revestimento.

Pó	(% em peso)
Ferro	40
Níquel	30
Carbetto de Tungstênio	30

Fonte: Autoria Própria.

3.1.2 Eletrodo Revestido

O eletrodo KST EH CR 70 foi escolhido para a execução do trabalho devido a sua elevada resistência a abrasão mesmo exposto a temperaturas elevadas. A base do eletrodo é o Ferro e o mesmo é indicado para ambientes de desgaste severo, muito utilizado nas indústrias sucroalcooleiras; possui dureza média de 60 – 68 HRC (KESTRA, 2017).

Anteriormente a aplicação do revestimento, os eletrodos passaram por um processo de extinção de umidade, ficando por cerca de 4 horas em uma estufa a

120°. A Tabela 5 apresenta a composição química do eletrodo revestido KST EH CR 70.

Tabela 5 - Composição química do eletrodo KST EH CR 70.

Composição Química	(%)
Fe	Rest.
C	4,80 – 6,0
Cr	38,0 - 42,0
Mn	0,30 - 1,0
Si	1,0 - 2,0
B	0,60 - 2,0

Fonte: Adaptado de Kestra (2017).

3.1.3 Substratos

Foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020, com composição discriminada na Tabela 6. Todas as chapas foram cortadas com dimensões de 170x63x12,7mm.

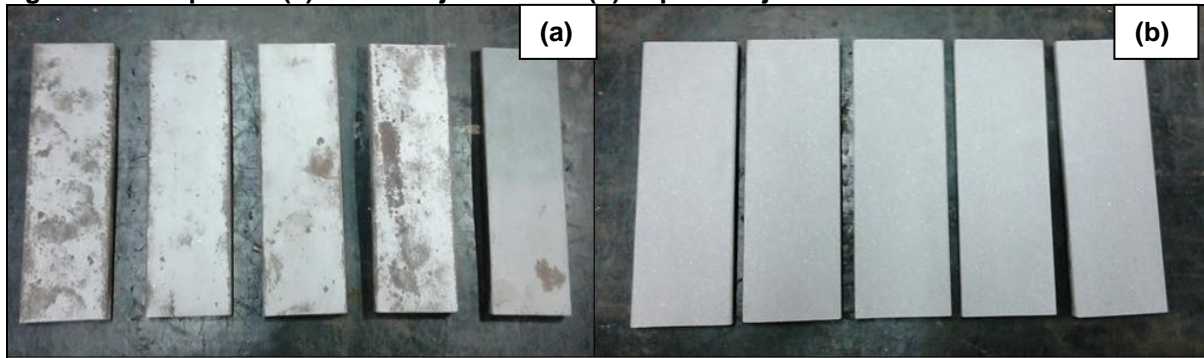
Tabela 6 - Composição química do aço SAE 1020.

Composição química	(%)
Fe	Rest.
C	0,18 – 0,23
Mn	0,40 – 0,60
Si	0,30 – 0,60
P	0,035 máx
S	0,035 máx

Fonte: Adaptado de Spectru (2017).

Para adquirir o grau de limpeza e rugosidade necessária para a aderência do revestimento, os corpos de prova foram jateados com abrasivos de óxido de alumínio branco 36 mesh, obedecendo à norma NACE RMN – 01/70 como mostra a Figura 13 (a) e (b).

Figura 13 - Corpos de (a) antes do jateamento (b) depois do jateamento.



Fonte: Autoria Própria

3.2 Equipamentos

3.2.1 Jateamento

O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para a obtenção de limpeza e aumento da rugosidade superficial. O processo consiste no choque de partículas abrasivas a velocidades relativamente altas contra a superfície do substrato (BRITO, 2010). Para o jateamento de abrasivos foi utilizada a cabine da marca CMV modelo 65 9075 localizada no laboratório LABATS do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPR. Os parâmetros adotados no processo de jateamento estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros empregados no jateamento.

Parâmetros	Valores Utilizados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco 36 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Gás de transporte	Ar comprimido
Pressão de jateamento	80 à 100 psi
Distância de jateamento	100 mm
Ângulo	90°

Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Rugosidade Superficial

É fundamental a obtenção de uma rugosidade superficial adequada, pois, é essa rugosidade que auxilia no ancoramento mecânico das partículas do revestimento (CASTRO et al, 2015).

Lima e Trevisan (2002) afirmam que de um modo geral, a rugosidade adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta R_a de 2,5 a 13 μm . No contexto do presente trabalho, para analisar as medidas de rugosidade provocadas pelo jateamento abrasivo, foi utilizado o equipamento MITUTOYO SJ-201, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-201.



Fonte: Autoria Própria

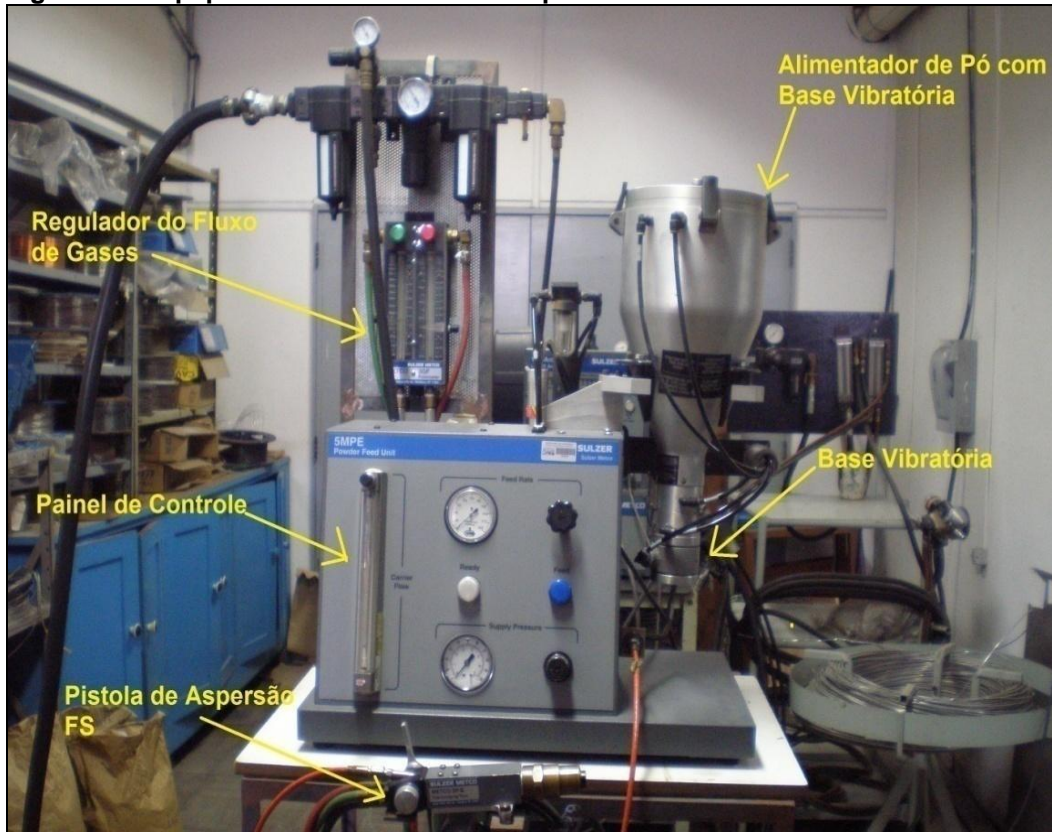
3.2.3 Deposição por Aspersão Térmica a Chama a Pó

Todas as deposições por aspersão térmica foram realizadas no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPR.

Foi utilizada a cabine de aspersão com sistema de exaustão via parede com lâmina de água. Utilizou-se como equipamento a pistola METCO – 6PII e alimentador RP5 do fabricante Sulzer, em conjunto com a bancada de aspersão, do

mesmo fabricante, modelo 5MPE como mostra a Figura 15. Os gases utilizados durante o processo de aspersão foram o oxigênio, acetileno e argônio.

Figura 15 - Equipamento de AT a chama a pó – UFPR - LABATS.

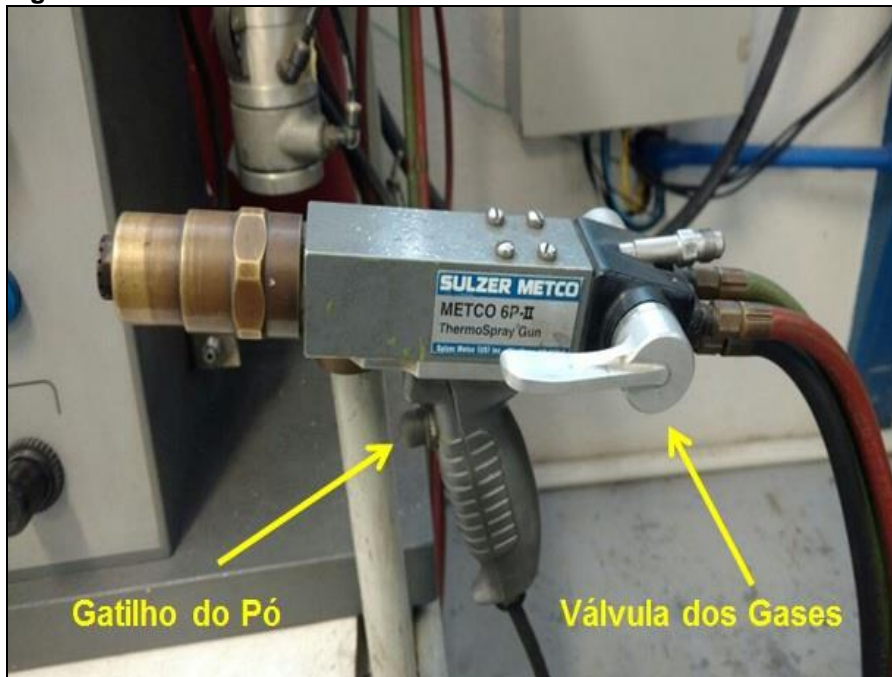


Fonte: Olívio (2012).

Pode-se visualizar na Figura 15 os controles de alimentação do pó, a unidade de alimentação com base vibratória e o fluxômetro de controle do gás de transporte (que no caso do presente estudo foi o gás argônio).

A Figura 16 mostra a pistola de aspersão térmica utilizada para o revestimento das amostras onde é possível visualizar a válvula de liberação dos gases e o gatilho de liberação do pó.

Figura 16 - Pistola METCO 6P – II utilizada no revestimento das amostras.



Fonte: Aatoria Própria.

Para a determinação dos valores adequados dos parâmetros, testes foram feitos inicialmente variando os valores dos fluxos dos gases e quantidade de camadas até a obtenção do revestimento estudado no presente trabalho. Os valores dos parâmetros utilizados na pesquisa encontram-se dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados no processo de revestimento.

Parâmetros	Valores utilizados
Distância substrato/tocha	150 mm
Número de camadas	3
Fluxo Argônio	0,42 m ³ /h
Fluxo Oxigênio	1,13 m ³ /h
Fluxo Acetileno	1,69 m ³ /h
Pressão Argônio	275,79 kPa (40 psi)
Pressão Oxigênio	275,79 kPa (40 psi)
Pressão Acetileno	103,41 kPa (15 psi)
Taxa de alimentação do pó	45 g/min

Fonte: Aatoria Própria.

3.2.3.1 Pré-Aquecimento

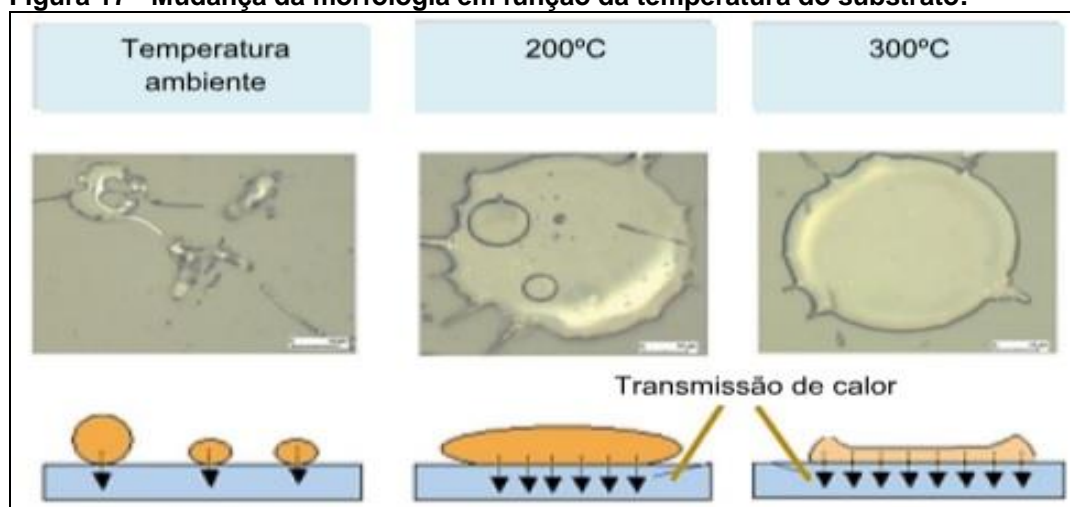
Além do jateamento de partículas abrasivas, o pré-aquecimento do substrato também faz parte da preparação da superfície das amostras para receber o revestimento.

O pré-aquecimento tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade que ficam detidos junto à superfície do metal (PAREDES, 2009), além de retardar o resfriamento das partículas para melhorar o contato substrato/partícula e promover uma maior adesão mecânica entre ambas. Entretanto, expor a superfície a ser revestida a altas temperaturas por tempos prolongados, pode resultar na produção de espessas camadas de óxidos, dessa forma, as temperaturas recomendadas para o pré-aquecimento estão na faixa de 90° a 150° (PADILHA, 2011).

As tensões internas existentes no material a ser revestido podem ser reduzidas por intermédio do pré-aquecimento, influenciando na aderência do revestimento; pelo fato da superfície estar aquecida, ocorrerá uma dilatação da mesma, que após ser realizada a aspensão e cessado o pré-aquecimento a contração do substrato reforçará o ancoramento mecânico (PAREDES 2009).

Na Figura 17, Killinger (2003) mostra a mudança na morfologia da partícula em função da temperatura do substrato, esclarecendo assim, a importância dessa prática no processo AT.

Figura 17 - Mudança da morfologia em função da temperatura do substrato.



Fonte: Paredes (2009) apud Killinger (2003).

Dessa forma, visando otimizar as propriedades do revestimento por AT na pesquisa em questão, os corpos de prova foram submetidos a um pré-aquecimento feito pela própria chama da pistola sem alimentação do pó, utilizando um pirômetro para a medição da temperatura do substrato até atingir 150°C.

3.2.3.2 Pós-Aquecimento

Tratamentos posteriores ao revestimento são utilizados com o objetivo de aumentar a qualidade do revestimento e melhorar propriedades do mesmo. Olívio (2012) constatou que quando utilizou pré e pós-aquecimento em suas amostras, os valores de microdureza foram maiores do que nas amostras que sofreram somente pré-aquecimento, além da dureza, verificou-se também que a porosidade diminuiu significativamente nas amostras com ambos os tratamentos.

Dentro desse contexto, buscando aumentar a homogeneidade do revestimento, foi realizado o pós-aquecimento das amostras com auxílio de um maçarico a gás. Os corpos de prova revestidos foram aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 250°.

3.2.4 Refusão

A refusão das amostras foi realizada no Laboratório de Soldagem da UTFPR – Cornélio Procópio, para a refusão dos revestimentos produzidos por aspersão térmica a chama a pó, foi utilizado o equipamento de soldagem da marca IMC modelo DIGI Plus A7, tocha 3,5 metros e gatilho. O gás utilizado no processo foi o argônio com 98% de pureza.

A aplicação da técnica de refusão foi adotada, objetivando a criação de uma ZTA entre o revestimento/substrato para, dessa forma, melhorar a aderência do revestimento e aumentar a resistência ao desgaste.

Para os parâmetros TIG, foram usados dados baseados na dissertação de Pereira (2000), como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros para refusão por soldagem TIG.

Parâmetros	Valores utilizados
Corrente Pulsada	$I_p = 180 \text{ A}$ $I_b = 140 \text{ A}$ $I_m = 160 \text{ A}$
Tempo	$T_p = 0,5\text{s}$ $T_b = 0,5\text{s}$
Distância tocha/peça	10 mm
Velocidade de soldagem	150 mm/min
Pressão do gás	150 kgf/cm ²
Vazão do gás	11 l/min

Fonte: Autoria Própria.

A refusão pelo processo de soldagem TIG, foi realizada acoplando a tocha ao tartilope V2 da marca IMC, que possibilitou o deslocamento automático da tocha como mostra a Figura 18. O sistema Tartilope V2 possibilita a movimentação automática em dois eixos e é frequentemente utilizado em processos de soldagem e corte de chapas metálicas.

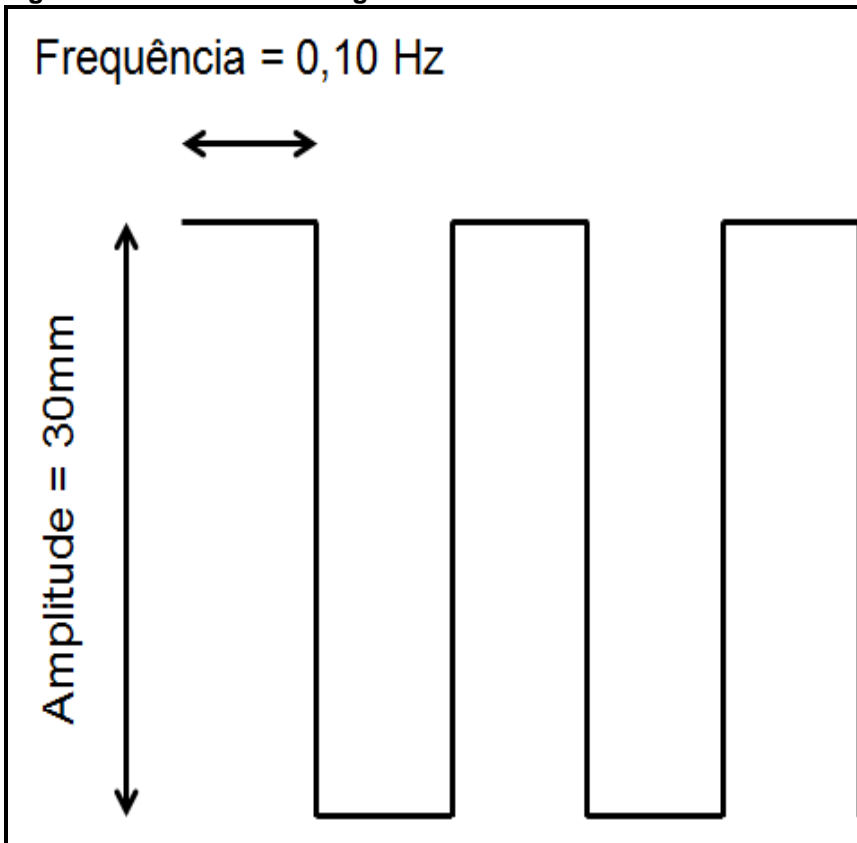
Figura 18 - Tartilope V2 IMC.



Fonte: http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php

O deslocamento da tocha, a frequência e a amplitude utilizada estão representados na Figura 19.

Figura 19 - Tecimento retangular da refusão com tocha TIG.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.5 Eletrodo Revestido

As deposições dos revestimentos por eletrodo revestido foram realizadas no Laboratório de Soldagem da UTFPR- Cornélio Procópio. O equipamento utilizado foi a máquina de solda elétrica Bambozzi, modelo Piccola 400T. Os parâmetros adotados para a soldagem de revestimento por eletrodo revestido atendiam às especificações do fabricante que estão dispostos na Tabela 10.

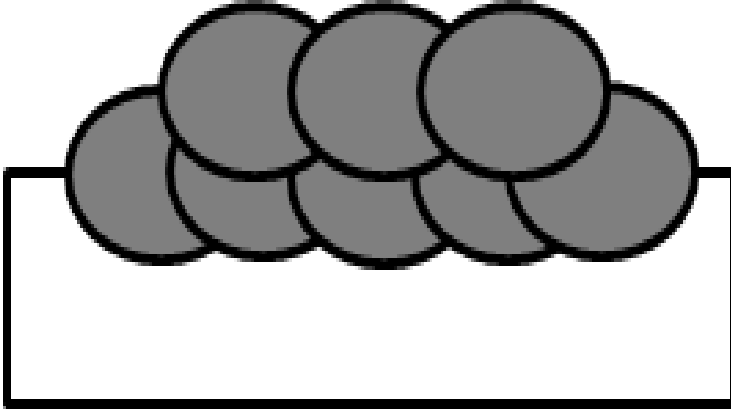
Tabela 10 - Parâmetros e especificações do fabricante.

Denominação do	Norma	Rendimento	Diâmetro \varnothing (mm)	Corrente
ER	ASME/AWS Normas DIN	(%)		(A)
KST EH CR 70	8555 E10 UM 65 GRZ	160	4	160-200

Fonte: Adaptado de Data Sheet Kestra (2017).

No total, foram soldados 8 cordões em cada amostra, conforme o desenho esquemático da Figura 20, divididos em duas camadas de revestimento, a primeira camada com 5 cordões e a segunda camada com 3 cordões.

Figura 20 – Desenho esquemático da Soldagem por ER.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 21 mostra os corpos de prova após o processo de soldagem da primeira camada de revestimento.

Figura 21 - Soldagem da primeira camada das amostras ER.



Fonte: Autoria Própria.

3.3 Identificação das Amostras

No total foram depositados quinze corpos de prova, sendo, cinco amostras para cada processo de revestimento. Todas as amostras foram confeccionadas nas mesmas medias (170x63x12,7mm) e com o mesmo material (SAE 1020).

Para facilitar a identificação dos revestimentos, os corpos de prova foram denominados de acordo com o tipo de processo utilizado, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Identificação dos corpos de prova.

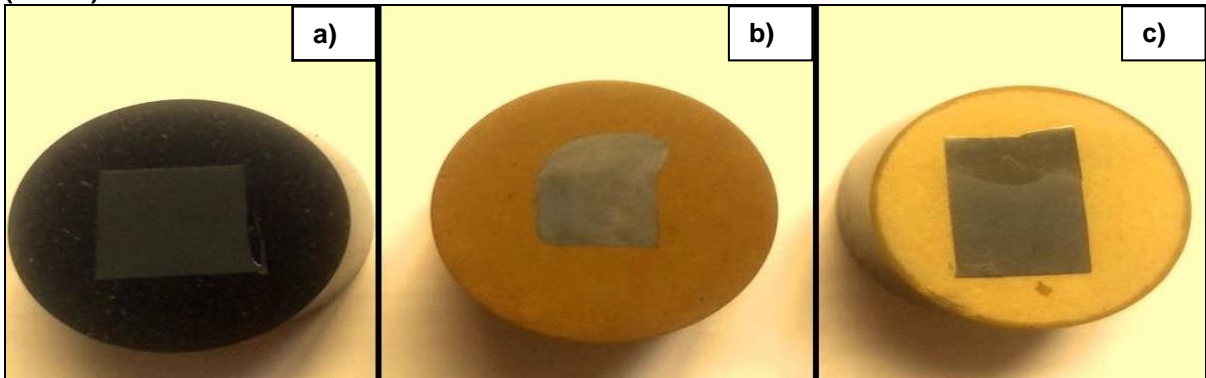
Descrição	Identificação
Amostras Aspergidas	AMAT
Amostras Refundidas	AMRE
Amostras Soldadas	AMER

Fonte: Autoria Própria.

3.4 Caracterização

Finalizado os processos de revestimento AT, AT com refusão e soldagem ER, as amostras de cada um desses processos foram cortadas utilizando discos de corte lisos na cortadora metalográfica. Uma das partes dos revestimentos AT e AT refundida e soldagem foram selecionadas e embutidas em baquelite preto e laranja, respectivamente como mostra a Figura 22 (a), (b) e (c), utilizando uma prensa embutidora automática da marca Arotec, modelo COR-40. As partes embutidas das amostras de cada revestimento, também passaram pelo processo de lixamento em politriz automática da marca Arotec, modelo APL -4D com lixas de granulometria de 100 à 1200. Após o processo de lixamento, as amostras foram polidas com pano de polimento e pasta de alumina 1 µm. Todos os procedimentos de caracterização foram realizados no Laboratório de Caracterização dos Materiais da UTFPR – Cornélio Procópio.

Figura 22 - Amostras embutidas: (a) Aspergida (AMAT), (b) Refundida (AMRE) e (c) Soldada (AMER).



Fonte: Autoria Própria.

3. 5 Análises e Ensaaios

3.5.1 Microscopia Ótica (MO)

As imagens para a análise por microscopia ótica foram capturadas através do microscópio ótico Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Microscópio Ótico.



Fonte: Autoria Própria

Através desse equipamento é possível capturar imagens com ampliações de 200 x à 1000 x, além da verificação da espessura do revestimento e a possibilidade de fazer a quantificação de poros.

3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) E EDS

Através da microscopia eletrônica de varredura, foi possível obter imagens com alta resolução do revestimento, além de uma análise química semi-quantitativa através do EDS acoplado. Utilizou-se o equipamento da marca Zeiss (Figura 24), onde, graças ao EDS acoplado ao MEV foi possível obter uma análise da composição química. Essa microanálise de energia dispersiva (EDS) foi feita utilizando o detector de energia dispersiva de raios X da marca Oxford, modelo INCA X-ACT. Os equipamentos utilizados (MEV e EDS) estão instalados na Central de Laboratórios de Pesquisas UNESP – Câmpus Bauru e no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR – Campus Curitiba. Através das microanálises executadas em ambos os laboratórios, foi possível realizar o mapeamento dos elementos encontrados em cada uma das amostras analisadas.

Figura 24 - MEV com EDS acoplado.



Fonte: Autoria Própria

3.5.3 Ensaio de Microdureza

A dureza Vickers baseia-se na resistência em que um determinado material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante com base quadrada e ângulo entre faces de 136° sob uma carga pré-determinada (OLÍVIO, 2012). Após o embutimento das amostras e demais procedimentos como denota o item 3.4, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers em cada um dos corpos de prova embutidos. Foram feitas indentações de acordo com a demanda do revestimento, sem espaçamentos pré-definidos, todavia, as indentações foram realizadas de modo que diferentes fases do revestimento pudessem ser ensaiadas (no contexto do revestimento AT) verificando a diferença na coloração do revestimento. A carga aplicada durante o ensaio foi de 300gf por 15 segundos. O equipamento utilizado foi o microdurômetro da marca Panantec, modelo ATMI (Figura 25) pertencente ao Laboratório de Ensaios dos Materiais da UTFPR – Cornélio Procópio.

Figura 25 - Microdurômetro.



Fonte: Autoria Própria

3.5.4 Ensaio de Desgaste por Roda de Borracha

Para a verificação da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento AT, foi feito o ensaio de abrasão a três corpos, de acordo com a norma ASTM G-65. A norma possui cinco procedimentos distintos (A, B, C, D e E) que

variam com relação ao tempo de aplicação e carga do ensaio (LIMA; TREVISAN, 2007).

O equipamento utilizado para o ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha pertence ao Laboratório de Tribologia da UDESC – Câmpus Joinville. O procedimento adotado para o ensaio foi o tipo B, recomendado para materiais com alta resistência a abrasão e materiais com média e baixa resistência, como orienta a norma ASTM G-65.

As amostras possuíam dimensões de 25x76x10mm. Foram ensaiadas cinco amostras de cada procedimento, onde, o desgaste de cada uma delas foi dado em função da perda de massa inicial menos e massa final.

Todas as amostras foram pesadas antes do ensaio, ensaiadas por um período de 10 minutos e pesadas novamente para verificar a perda de massa. A balança utilizada pertence ao Laboratório de Tribologia da UDESC e tem uma precisão de 0,001 gramas

Antes de iniciar os ensaios, cada uma das amostras foi limpa, imersa em álcool etílico 46° e secadas em ar quente. A descrição dos elementos e os parâmetros que foram adotados no ensaio de desgaste encontram-se disposto na Tabela 12.

Tabela 12 - Descrição dos elementos e parâmetros do ensaio de desgaste.

Descrição/Parâmetro	Valor
Dimensão do disco	12,7 x 228 mm
Dureza do anel de borracha	60 Shore
Abrasivo utilizado no ensaio	Areia - AFS 50/70
Rotação do disco	200 rpm
Tempo de ensaio	10 minutos
Força nominal	130 N
Vazão do abrasivo	350 g/min
N° de voltas	2000

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 26, apresenta o equipamento utilizado no ensaio de desgaste por roda de borracha. O equipamento atende às especificações da norma ASTM G65, 2001.

Figura 26 - Abrasômetro Roda de Borracha.



Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS

4.1 Rugosidade Média dos Substratos

Os valores da rugosidade média das amostras AMAT, AMRE e AMER estão dispostos na Tabela 13. As medições de rugosidade foram realizadas sobre os corpos do prova após o jateamento conforme os parâmetros dispostos na Tabela 7.

Tabela 13 - Rugosidade média das amostras AMAT e AMER após o jateamento.

Amostra	Ra (μm)	Desvio Padrão
AMAT	8,10	1,09
AMRE	7,89	0,90
AMER	7,86	1,03

Fonte: Autoria Própria

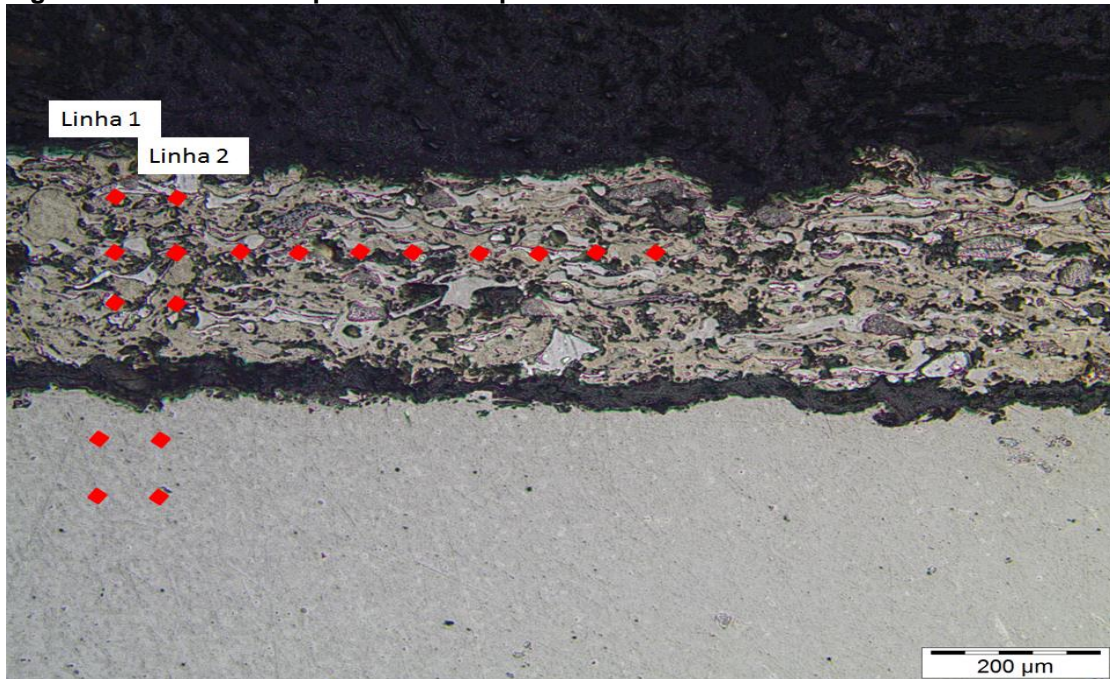
Segundo a literatura, recomenda-se que para revestimentos produzidos por aspersão térmica em aços 1020, a rugosidade ideal deve ser $Ra > 6 \mu\text{m}$. De acordo com a norma da Petrobrás N-2568, a possibilidade de se obter uma maior aderência do revestimento nessa faixa de rugosidade é potencializada (BELÉM; FALS; LIMA, 2015).

4.2 Microdureza Vickers

4.2.1 Amostra AMAT

Durante o ensaio, foram feitas medidas de dureza ao longo da seção vertical e horizontal dos revestimentos. Na seção vertical, para verificar o comportamento em relação ao metal de base e, na horizontal para verificar a homogeneidade, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 – Desenho esquemático dos pontos de microdureza das amostras de AMAT.



Fonte: Autorial Própria

Os revestimentos depositados pelo processo de aspersão térmica são característicos pela formação de várias fases diferentes; esse fato pode ser usado para justificar o alto desvio padrão. Isso acontece, pois, ao escolher pontos aleatórios para o ensaio de Microdureza Vickers, as indentações não atingem somente uma fase do revestimento.

Além do desvio padrão, a Tabela 14 apresenta a média da dureza medida na horizontal do revestimento AT.

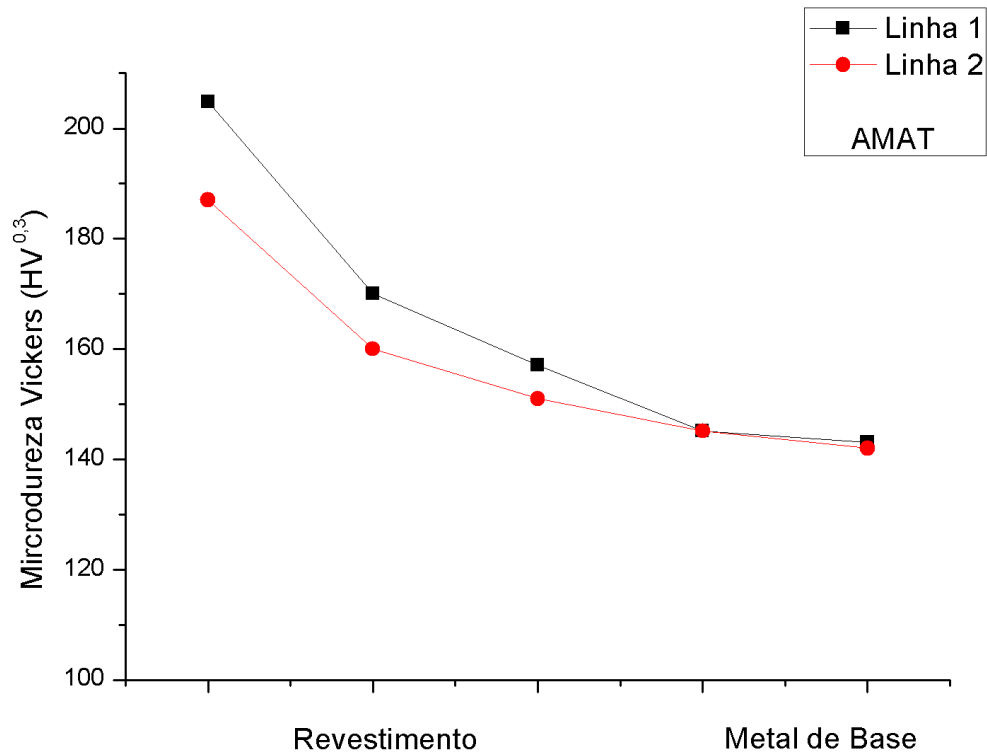
Tabela 14 - Média e desvio padrão da microdureza medidos horizontalmente no revestimento AMAT.

	Média HV _{0,3}
Linha horizontal	189,33 HV _{0,3}
Desvio Padrão	26,23

Fonte: Autorial Própria

A Figura 28 apresenta o gráfico das microdurezas medidas na seção vertical do revestimento AT.

Figura 28 – Microdureza da seção vertical das amostras AMAT



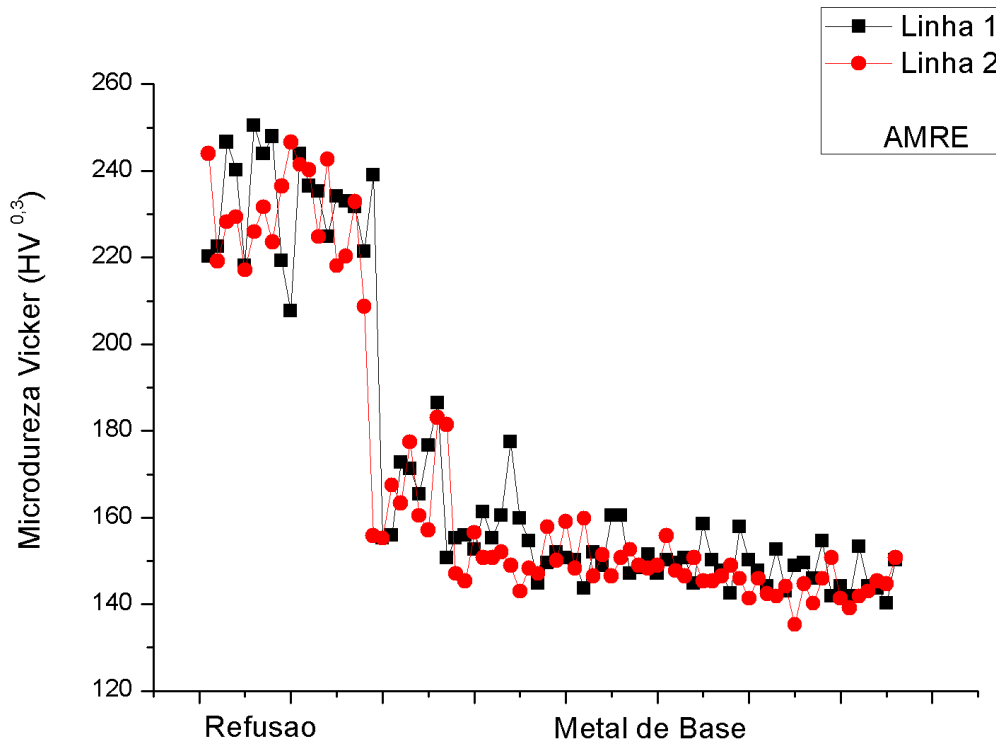
Fonte: Autoria Própria

Analisando o crescimento da curva das amostras AMAT indicado na Figura 28, é possível notar um aumento da dureza do revestimento com relação ao metal de base, onde, os valores máximos de dureza medidos para o aço não excedem 150 HV_{0,3}.

4.2.2 Amostra AMRE

A microdureza para as amostras refundidas foi realizada em 2 linhas na seção vertical do corpo de prova, do topo do revestimento até a base. Os resultados obtidos no ensaio encontram-se na Figura 29.

Figura 29 – Microdureza da seção vertical das amostras AMRE.



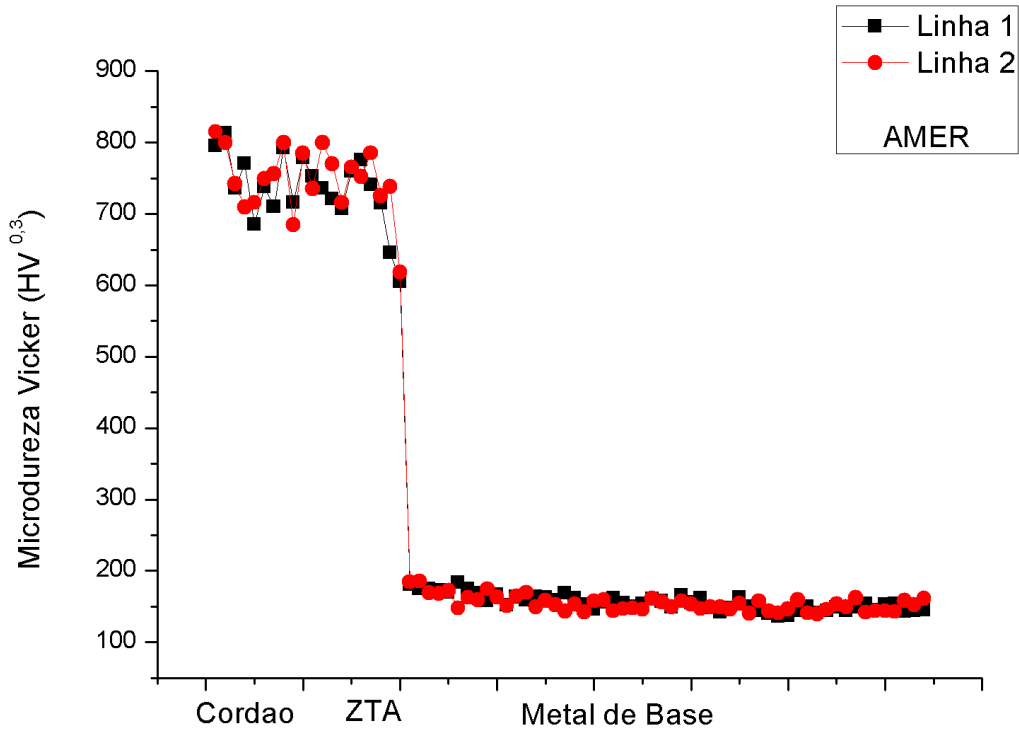
Fonte: Autoria Própria.

É notável que após o processo de refusão do revestimento produzido por AT nas amostras AMRE, os valores de microdureza aumentaram consideravelmente quando comparados com os das amostras AMAT que não ultrapassaram 210 HV_{0,3}. Isso se deve à diluição do revestimento com o metal de base e às mudanças microestruturais sofridas pelo revestimento após a refusão.

4.2.3 Amostra AMER

No revestimento produzido pelo processo de soldagem por eletrodo revestido, foram feitas medições de dureza ao longo de 2 linhas na seção vertical do topo do cordão ao final do metal de base. A Figura 30 mostra o gráfico com os valores de microdurezas.

Figura 30 – Microdureza da seção vertical das amostras AMER.



Fonte: Autoria Própria

Os valores verificados no ensaio de microdureza das amostras AMER se mostraram extremamente altos, esse fato é atribuído à composição do eletrodo EH CR 70 onde o mesmo possui alto teor de carbono (4,8 a 6,0%) e alto cromo (38,0 a 42,0%), atribuindo assim às amostras AMER microdureza superiores as demais amostras analisadas.

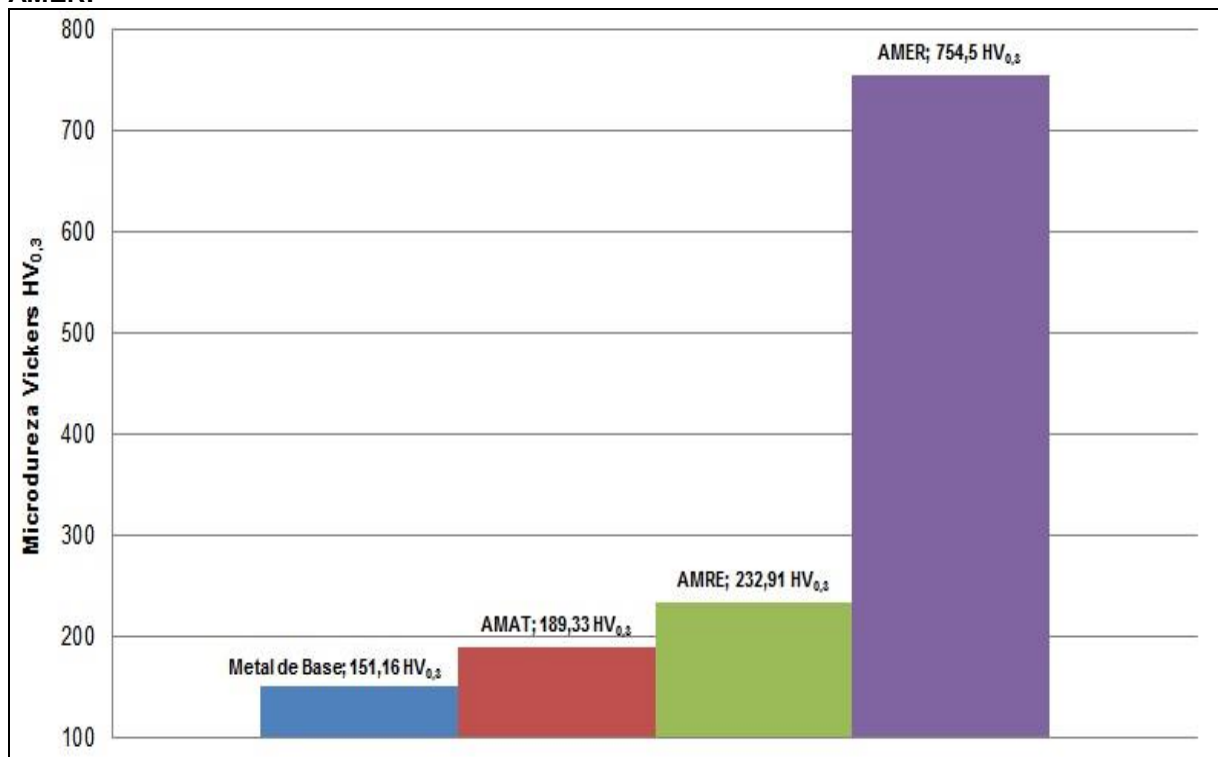
Comparando os resultados de microdureza do metal de base e do revestimento, é possível observar um aumento extremamente significativo de dureza na superfície revestida. Enquanto os valores de microdureza para o aço utilizado não ultrapassaram 200 HV_{0,3}, o revestimento ER apresentou todas as durezas superiores a 580 HV_{0,3}.

4.2.4 Comparativo Gráfico e Percentual das Microdurezas

A diferença da microdureza entre os revestimentos aspergidos (AMAT e AMRE) e o revestimento produzido por soldagem com eletrodo revestido se mostrou ser extremamente elevada. Enquanto a amostra AMAT apresentou dureza média de 189,33 HV_{0,3}, a amostra AMER obteve uma média de 754,50 HV_{0,3}. Esses valores indicam uma diferença superior da amostra AMER de 298,51% com relação à AMAT e 223,9% com relação à AMRE, com relação ao Metal de Base a diferença é de quase 400%.

A Figura 31 apresenta graficamente os resultados das médias para o Metal de Base e as amostras AMAT, AMRE e AMER.

Figura 31 - Média das Microdurezas Vickers do Metal de Base e das Amostras AMAT, AMRE e AMER.



Fonte: Autoria Própria.

No contexto do ensaio de Microdureza Vickers a Figura 31 deixa visível a inferioridade dos revestimentos depositados por aspersion térmica com relação ao revestimento depositado pelo processo de soldagem por eletrodo revestido.

Apesar do fato de que a microestrutura rege as propriedades de resistência ao desgaste, quando se trata de desgaste a baixas tensões, uma dureza

elevada atribuíra a peça de trabalho maior resistência a solicitações abrasivas (LIMA, 2008).

4.3 Microscopia Ótica

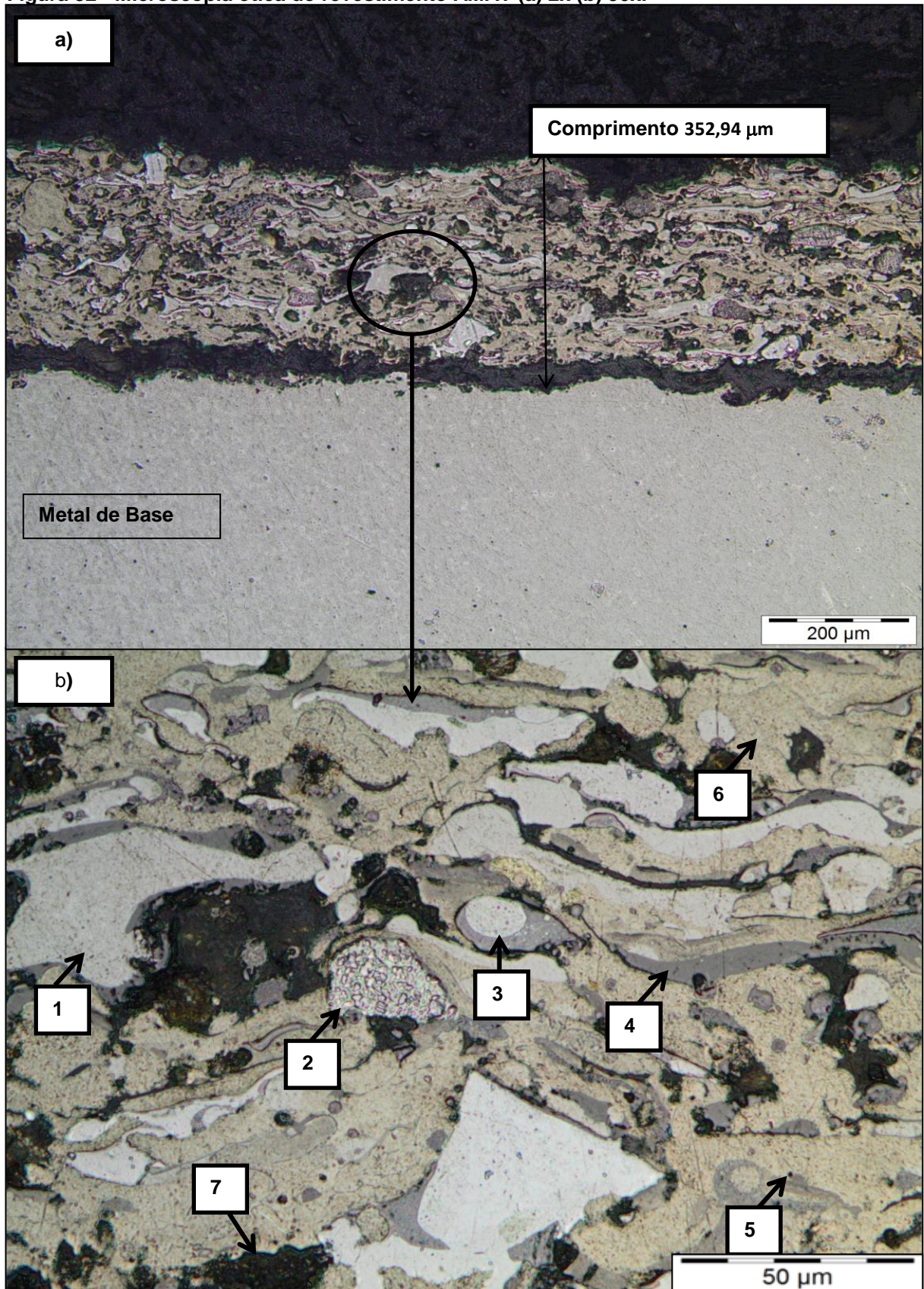
4.3.1 Microscopias Óticas dos Revestimentos

4.3.2.1 Aspersão Térmica

A Figura 32 (a) apresenta a medição e a morfologia do revestimento produzido pelo processo de aspersão térmica com ampliação de 2x; ainda na Figura 33 (a) é possível observar o metal de base e a ancoragem do revestimento sobre o mesmo. O comprimento total de 352,94 μm foi obtido após a deposição de três camadas de revestimento provenientes da mistura 40Fe30Ni30WC.

Na Figura 33 (b) é possível observar um revestimento denso, com moderada homogeneidade e panquecas bem definidas. A coloração do revestimento se deve pelo fato do mesmo não ter sido obtido por pó atomizado, ou seja, os pós que o compõem foram somente misturados mecanicamente por intermédio de um torno convencional e um misturador do tipo Y (metodologia descrita no item 3.1.1).

Figura 32 - Microscopia ótica do revestimento AMAT (a) 2x (b) 50x.



Fonte: Autoria Própria.

As setas destacadas na Figura 32 (b) indicam os seguintes elementos:

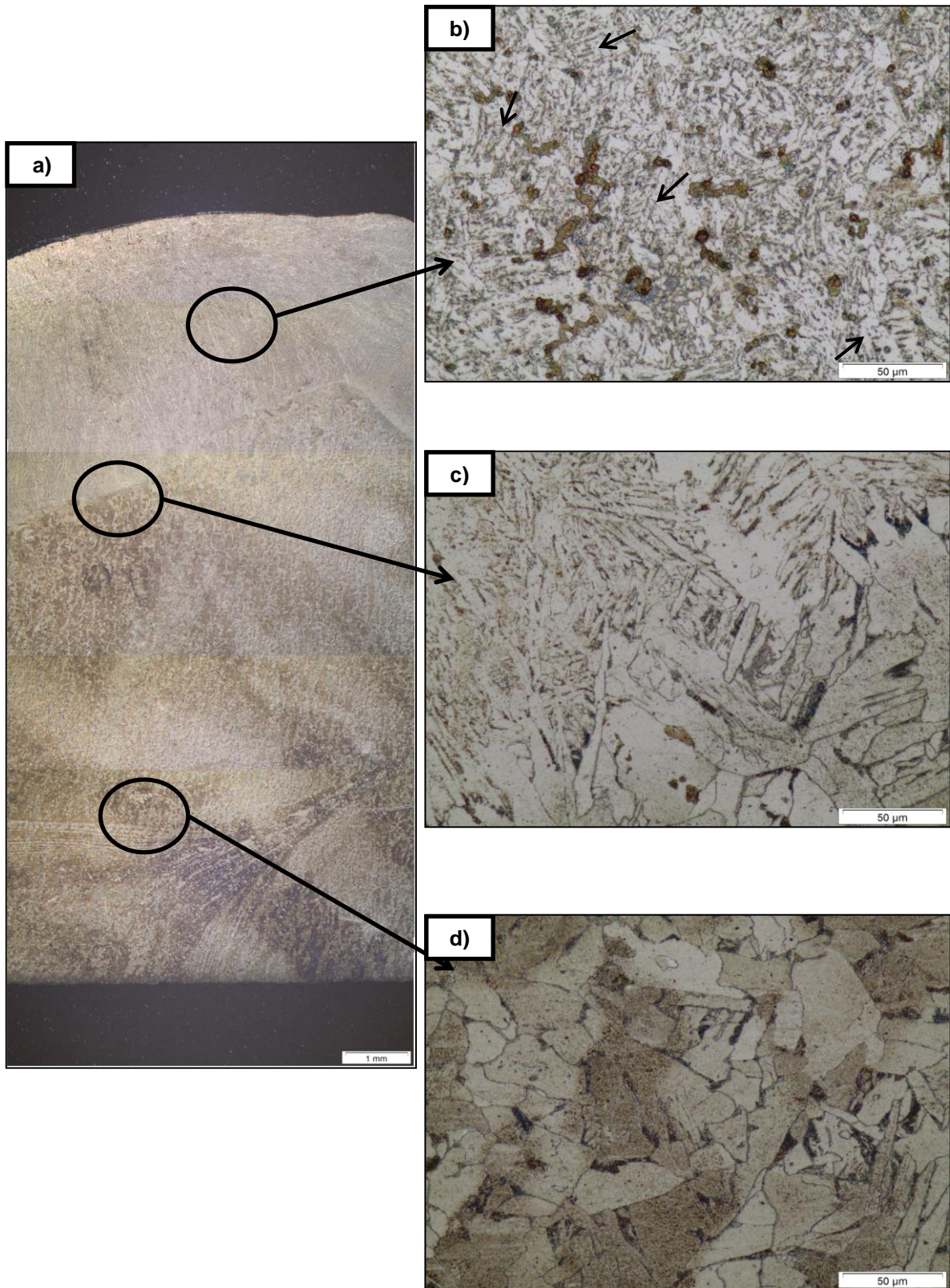
- A seta 1: aponta para uma das panquecas de níquel (Ni).
- A seta 2: indica uma das panquecas formadas por carbeto de tungstênio (CW).
- A seta 3: indica a presença de salpicos formados devido ao espalhamento das partículas fundidas. Essas partículas assumem geometria esférica e podem ser observadas em diversos pontos do revestimento.
- A seta 4: indica um dos pontos do revestimento onde nota-se a formação de óxido de níquel (NiO).
- A seta 5: indica um dos poros existentes no revestimento. As porosidades formadas no revestimento em questão encontram-se entre as lamelas, causados pelo empilhamento de partículas separadas. Esse tipo de porosidade encontrada no revestimento pode ser relacionada ao tamanho da partícula aspergida e a característica do material de alimentação (MENEZES, 2007).
- A seta 6: indica uma das panquecas de ferro (Fe).
- A seta 7: aponta para um dos pontos onde é possível notar a presença de inclusão de óxidos provenientes do processo de lixamento.

4.3.2.2 Aspersão Térmica Refundida

A microestrutura do revestimento depositado por aspersão térmica e refundido com soldagem TIG também foi analisada (amostra AMRE). A Figura 33 (a) apresenta uma microscopia do revestimento utilizando uma lente de 2x, nota-se que o revestimento depositado pelo processo de AT diluiu completamente no metal de base.

A Figura 33(b) é uma microscopia do revestimento refundido capturada com lente de ampliação de 20x onde é possível visualizar uma microestrutura com grãos finos e desordenados. Os pontos destacados pelas setas na figura apontam para regiões onde houve crescimento dendrítico. Esse tipo de microestrutura é característico quando a superfície do metal fundido fica exposta ao ar.

Figura 33 - a) Corpo de Prova de AT refundido com ampliação de 2x. b) Ampliação de 50x na camada refundida. c) Ampliação de 50x na Zona de ligação. d) Ampliação de 50x no metal de base.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 33 (c), nota-se uma diferença microestrutural entre o revestimento refundido e o metal de base. A microestrutura do metal de base assume aparência de material com dureza inferior quando comparada com o revestimento. A grande maioria dos produtos fundidos que apresentam estrutura dendrítica, à medida que essas crescem, ocorre à fratura das mesmas. Quanto mais finas forem as dendritas, mais facilmente elas se quebram. Dessa forma, a alta taxa de solidificação, provocada pelo resfriamento “rápido” do revestimento refundido favoreceu a formação de dendritas finas com grãos pequenos, caracterizando um material com dureza superior a do revestimento sem refusão.

Na Figura 33 (d) é possível perceber que os grãos do metal de base são significativamente maiores e alguns apresentam coloração clara (microestrutura característica de aços com baixo teor de carbono).

4.3.2.3 Eletrodo Revestido

A análise do revestimento produzido por soldagem com eletrodo revestido possibilitou avaliar a microestrutura do mesmo, onde, assim como no caso da amostra AMRE (item 4.3.2.2), foi verificada disparidade entre os grãos do revestimento e do metal de base, como mostra a Figura 34 (a).

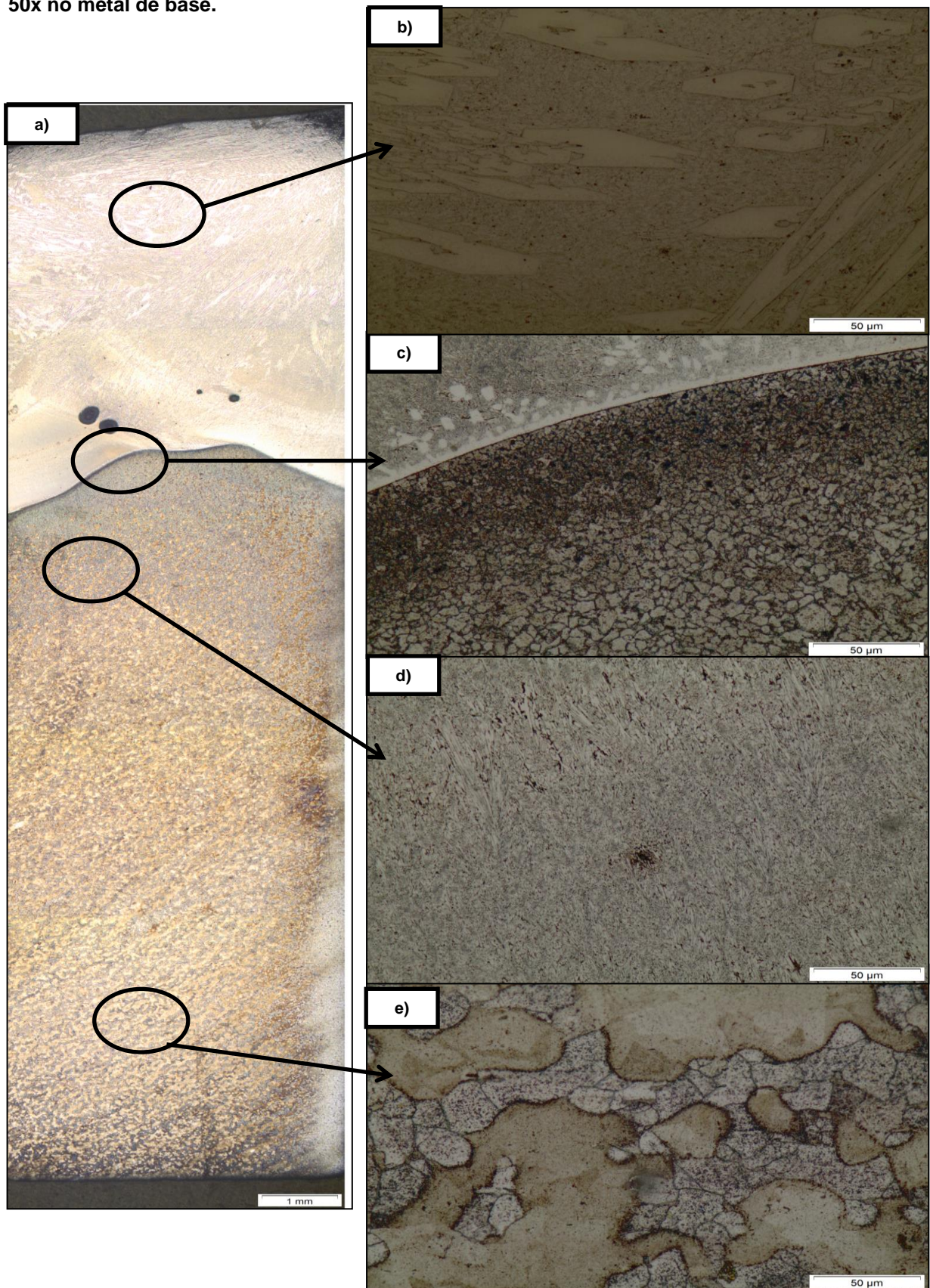
Para visualizar com detalhes a microestrutura do revestimento foi necessário utilizar de uma lente de ampliação de 50x, como mostra a Figura 34 (b). Analisando a imagem é possível verificar uma microestrutura homogênea, com formação de fases sem orientação cristalográfica preferencial.

Na zona de ligação (Figura 34 c), é notável a diferença microestrutural entre o revestimento e o metal de base.

Na Figura 34 (d), a ZTA apresenta microestrutura com grãos finos e alongados.

No metal de base (Figura 34 e) os grãos apresentam tamanho superior aos que compõem o revestimento.

Figura 34 - a) Corpo de Prova Soldado com ampliação de 2x. b) Ampliação de 50x do cordão de solda. c) Ampliação de 50x na Zona de ligação. d) Ampliação de 50x da ZTA . e) Ampliação de 50x no metal de base.



Fonte: Autoria Própria.

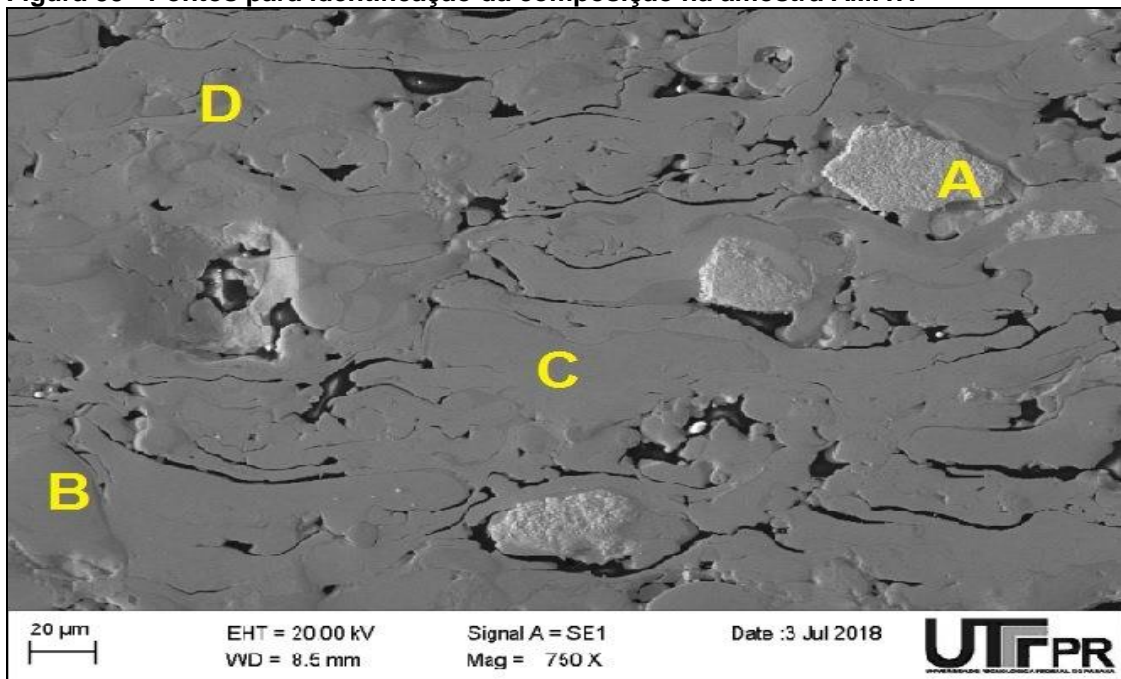
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS dos Revestimentos

4.4.1 Revestimento produzido por Aspersão Térmica

A Figura 35 apresenta a imagem do revestimento produzido por aspersão térmica obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. Utilizando a técnica de energia dispersiva (EDS), foi possível caracterizar regiões específicas que auxiliaram na identificação dos elementos que compunham o revestimento.

Os pontos destacados na imagem foram selecionados em virtude da textura, formato e distribuição na matriz, para dessa forma, identificar as regiões ricas em elementos que faziam parte da mistura utilizada.

Figura 35 - Pontos para identificação da composição na amostra AMAT.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 15 apresenta a composição química de cada ponto e seus respectivos valores percentuais.

Tabela 15 - Composição dos pontos A, B, C e D – amostra AMAT.

Elementos	%A	%B	%C	%D
O	-	-	-	13,62
Si	-	-	-	0,68
Mn	-	-	-	1,22
Fe	0,32	0,95	82,06	54,29
Co	6,66	9,58	-	-
Ni	1,20	44,46	11,99	22,74
W	85,74	41,69	3,61	5,08

Fonte: Aatoria Própria.

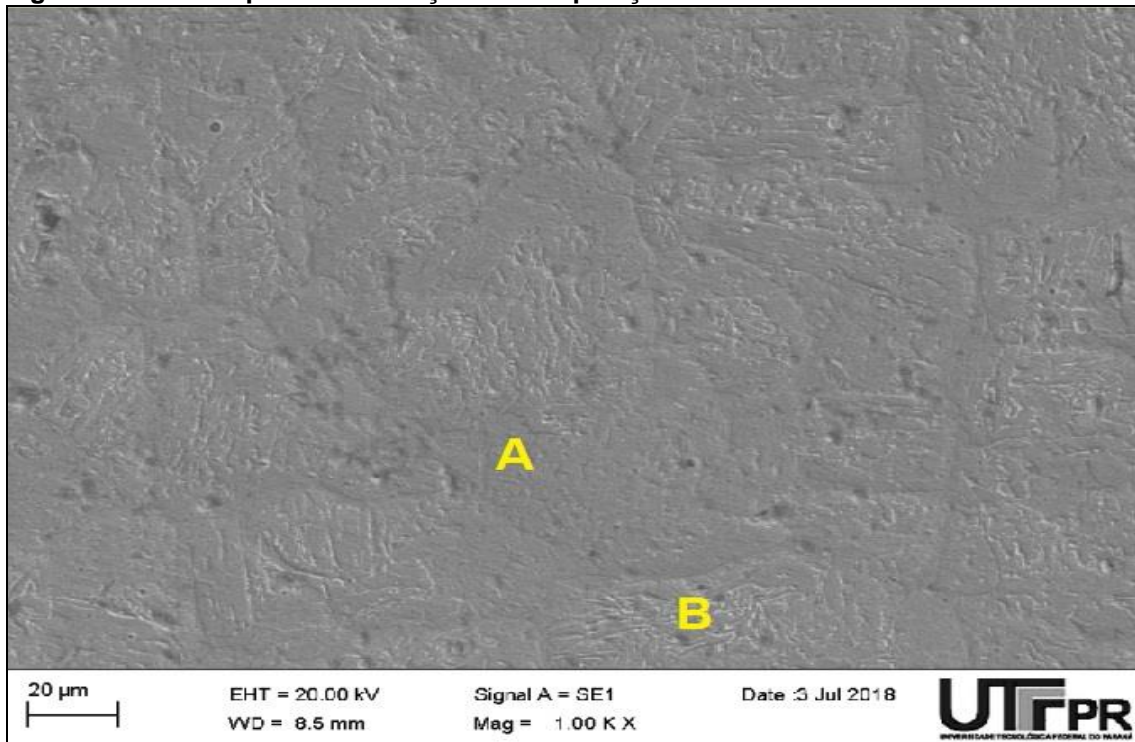
Os elementos detectados pela análise EDS conferem com a composição química da mistura utilizada para os revestimentos depositados por aspersão térmica. A composição da mistura dos pós está indicada na Tabela 4.

4.4.2 Revestimento produzido por Aspersão Térmica e Refundido

A Figura 36 apresenta a microestrutura do revestimento refundido, obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, observando assim uma microestrutura regular e homogênea.

Utilizando a análise por energia dispersiva (EDS), foi possível identificar a composição química de pontos específicos do revestimento, que foram definidos em virtude da textura e aparência dos grãos.

Figura 36 - Pontos para identificação da composição da amostra AMRE.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 16 apresenta a composição química dos pontos destacados e seus respectivos valores percentuais.

Tabela 16 - Composição do revestimento refundido – amostra AMRE.

Elemento	%A	%B
O	1,37	1,53
Al	-	0,26
Fe	89,83	89,28
Ni	2,95	2,68

Fonte: Autoria Própria.

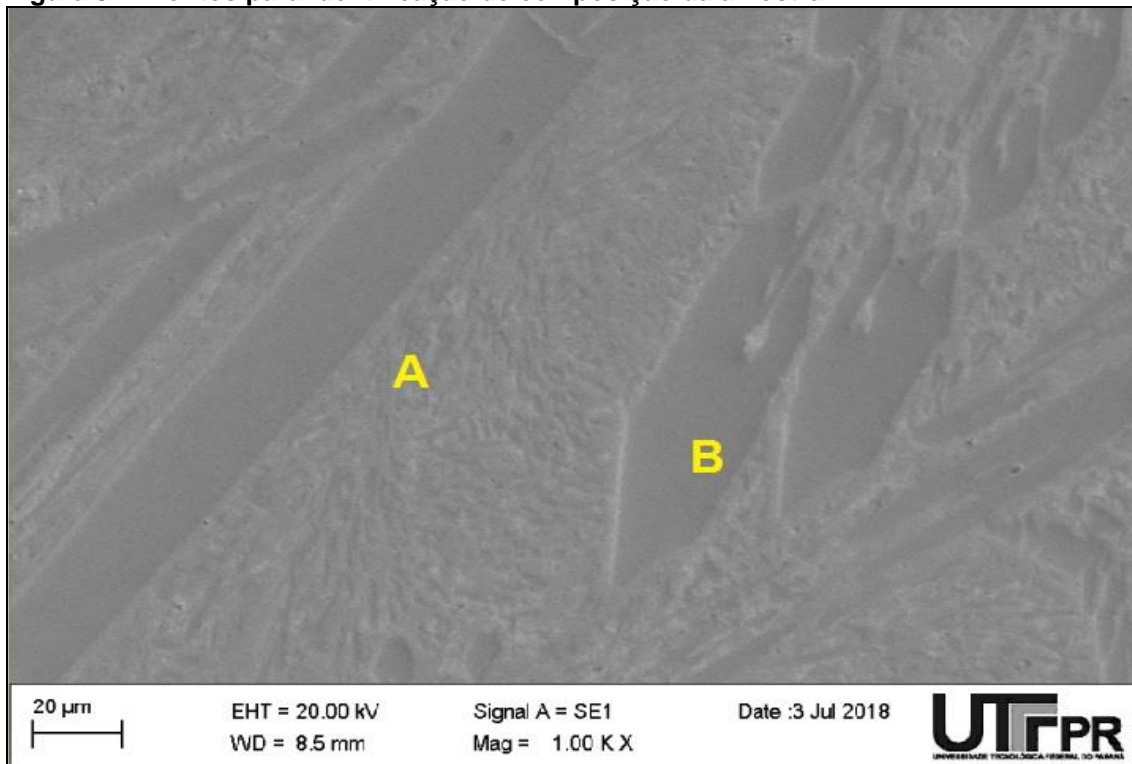
Em virtude da refusão do revestimento com o metal de base, não houve a detecção do elemento W. O elemento Ni também não foi verificado em grande quantidade nos pontos analisados.

4.4.3 Revestimento produzido por soldagem com Eletrodo Revestido

A análise via MEV do revestimento produzido por soldagem com eletrodo revestido possibilitou caracterizar uma microestrutura homogênea. Através da técnica EDS foi possível executar uma análise quantitativa e conhecer a composição química global do mesmo.

A Figura 37 apresenta a imagem obtida pela análise MEV do revestimento depositado na amostra AMAT. Os pontos destacados foram definidos em virtude da textura, arranjo e formato de grão.

Figura 37 - Pontos para identificação de composição da amostra AMER.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 17 a seguir, apresenta os valores em termos percentuais da composição química do revestimento produzido pela soldagem por eletrodo revestido obtido pela análise EDS.

Tabela 17 - Composição do revestimento ER – amostra AMER.

Elemento	%A	%B
Si	1,27	-
Cr	22,87	49,62
Mn	-	-
Fe	69,62	41,36

Fonte: Autoria Própria.

Os elementos verificados pela análise EDS comprovam a composição química do eletrodo EH CR 70 utilizado para o revestimento (Tabela 5). Todavia, o Boro (B) não é identificado no revestimento, isso se deve ao fato do mesmo possuir peso atômico baixo, sendo uma limitação da técnica EDS a identificação desse elemento.

4.5 Ensaio de Desgaste por Roda de Borracha

As quinze amostras confeccionadas para o ensaio de desgaste por abrasômetro tipo Roda de Borracha, foram ensaiadas por um período interrupto de 10 minutos, como estabelece o procedimento B da norma ASTM G65-00. A descrição dos elementos e parâmetros utilizados no ensaio estão listados na Tabela 12.

Após a realização do ensaio, as amostras foram cuidadosamente limpas em álcool, secas e pesadas para a verificação da perda de massa.

Para a determinação da perda de massa de cada uma das amostras, foi realizado o cálculo da diferença das massas antes e depois do ensaio.

A Tabela 18 apresenta os dados obtidos após o ensaio. As amostras foram identificadas de acordo com o processo de revestimento utilizado. Os valores de desgaste individual das amostras foram calculados e pode-se determinar o desgaste médio de cada técnica e também para o metal de base.

Tabela 18 - Desgaste individual e média de desgaste por processo.

Processo	Identificação da Amostra	Desgaste por Amostra (g)	Desgaste médio (g)
Metal de Base – Aço 1020	METAL_Desg 1	0,690	0,667
	METAL_Desg 2	0,687	
	METAL_Desg 3	0,646	
	METAL_Desg 4	0,609	
	METAL_Desg 5	0,704	
Aspersão Térmica	AMAT_Desg 1	0,848	0,889
	AMAT_Desg 2	0,925	
	AMAT_Desg 3	0,904	
	AMAT_Desg 4	0,795	
	AMAT_Desg 5	0,976	
Aspersão Térmica Refundida	AMRE_Desg 1	0,554	0,543
	AMRE_Desg 2	0,584	
	AMRE_Desg 3	0,549	
	AMRE_Desg 4	0,494	
	AMRE_Desg 5	0,537	
Soldagem por Eletrodo Revestido	AMER_Des 1	0,160	0,167
	AMER_Des 2	0,153	
	AMER_Des 3	0,174	
	AMER_Des 4	0,168	
	AMER_Des 5	0,182	

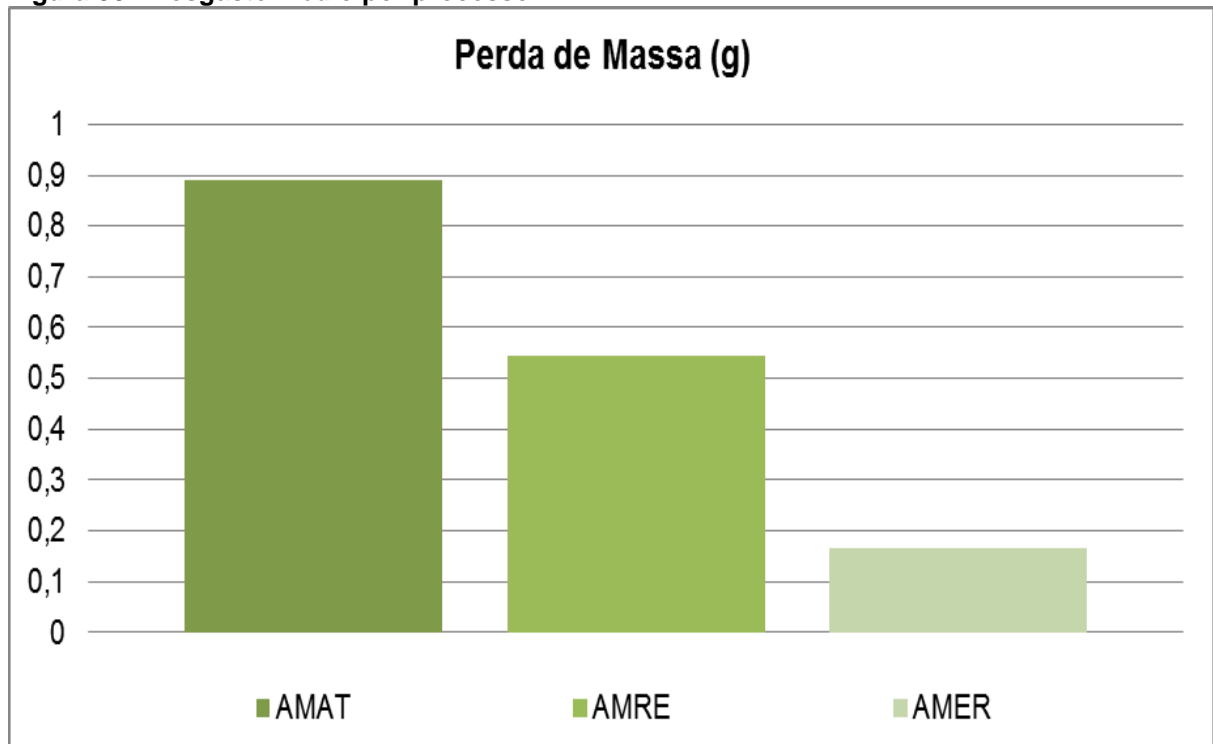
Fonte: Aatoria Própria.

Analisando a Tabela 18, é possível observar que as amostras do aço 1020 obtiveram desempenho superior quando comparadas as de Aspersão Térmica (AMAT). Isso aconteceu, pois, as amostras AMAT, além de perderem o revestimento depositado, tiveram também a perda do metal de base, resultando assim em um desgaste superior a todas as amostras ensaiadas.

A Figura 38 ilustra graficamente o desgaste médio obtido por cada processo de revestimento. Observa-se que o processo de soldagem por eletrodo revestido obteve os menores valores de perda de massa, seguido pelo processo de aspersão térmica refundida.

O processo de aspersão térmica sem refusão foi o que apresentou os maiores valores de desgaste por amostras individuais e também a maior média de perda de massa.

Figura 38 - Desgaste médio por processo.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 38 foi construída com os valores médios de desgaste por técnica de revestimento utilizada. É possível verificar que a resistência ao desgaste foi proporcional aos valores de dureza de cada revestimento (item 4.2).

Esse resultado coincide com Hernandez (1997), onde o qual constata que, apesar da influência da microestrutura ser predominante na resistência ao desgaste, quando se trata de solicitações de baixas tensões, uma maior resistência ao desgaste é obtida com a utilização de ligas que apresentem durezas elevadas.

A microestrutura é um fator mais importante do que a dureza na resistência ao desgaste de uma liga, tendo em vista que, diferentes microestruturas com durezas similares podem apresentar comportamentos distintos de resistência

ao desgaste (KOTECKI; OGBORN, 1995). Todavia, no contexto da abrasão a baixas tensões, o aumento da dureza pode contribuir para uma melhora significativa da resistência ao desgaste, principalmente quando o revestimento duro possui base de ferro e é aplicado sobre substratos de aço de baixo ou médio carbono (LIMA, 2008).

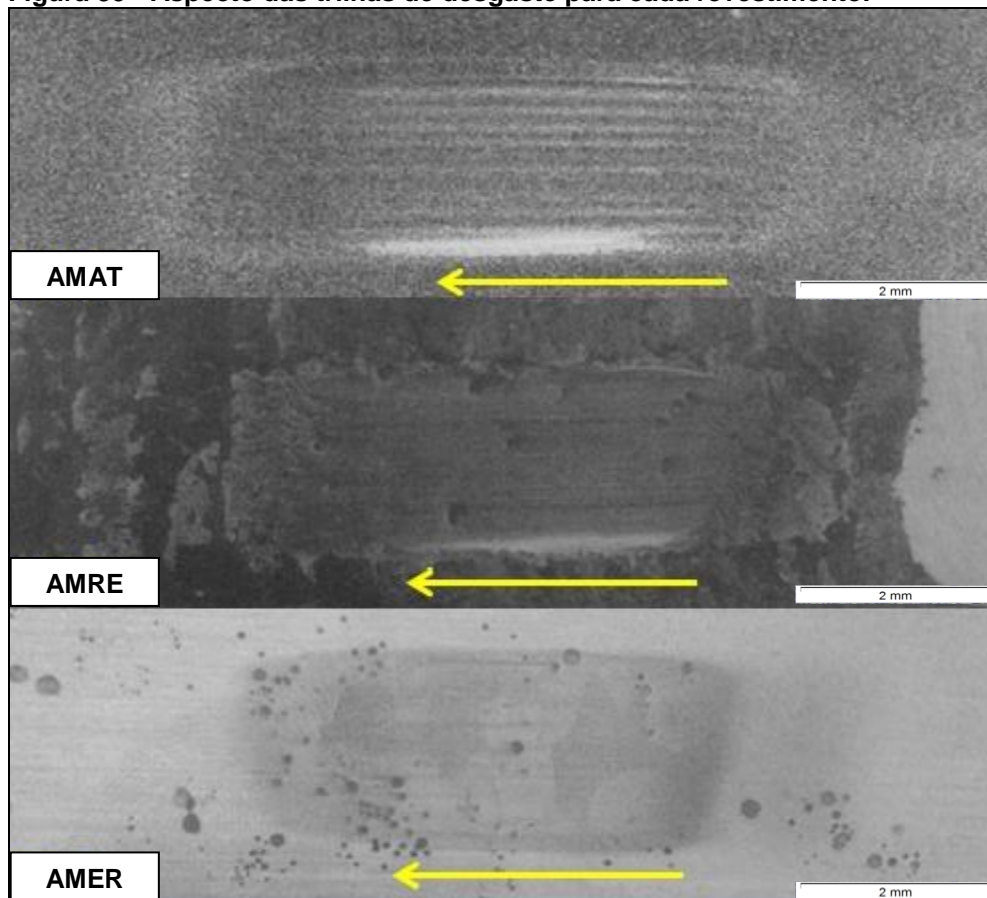
A diluição do revestimento também é importante para o aumento da resistência ao desgaste, uma vez que as amostras AMRE, produzidas por AT e refundidas, apresentaram uma diminuição significativa de perda de massa no ensaio de desgaste quando comparadas com as amostras somente aspergidas (AMAT).

4.5.1 Análise das Trilhas de Desgaste

As amostras ensaiadas apresentaram características distintas em suas respectivas trilhas de desgaste. A Figura 39 apresenta o aspecto das trilhas para cada processo de revestimento adotado. As setas indicam sentido de entrada das partículas abrasivas durante o ensaio.

É muito clara a dessemelhança na aparência de cada uma das trilhas, o que faz referência aos mecanismos de desgaste diferentes que atuaram em cada revestimento.

Figura 39 - Aspecto das trilhas de desgaste para cada revestimento.



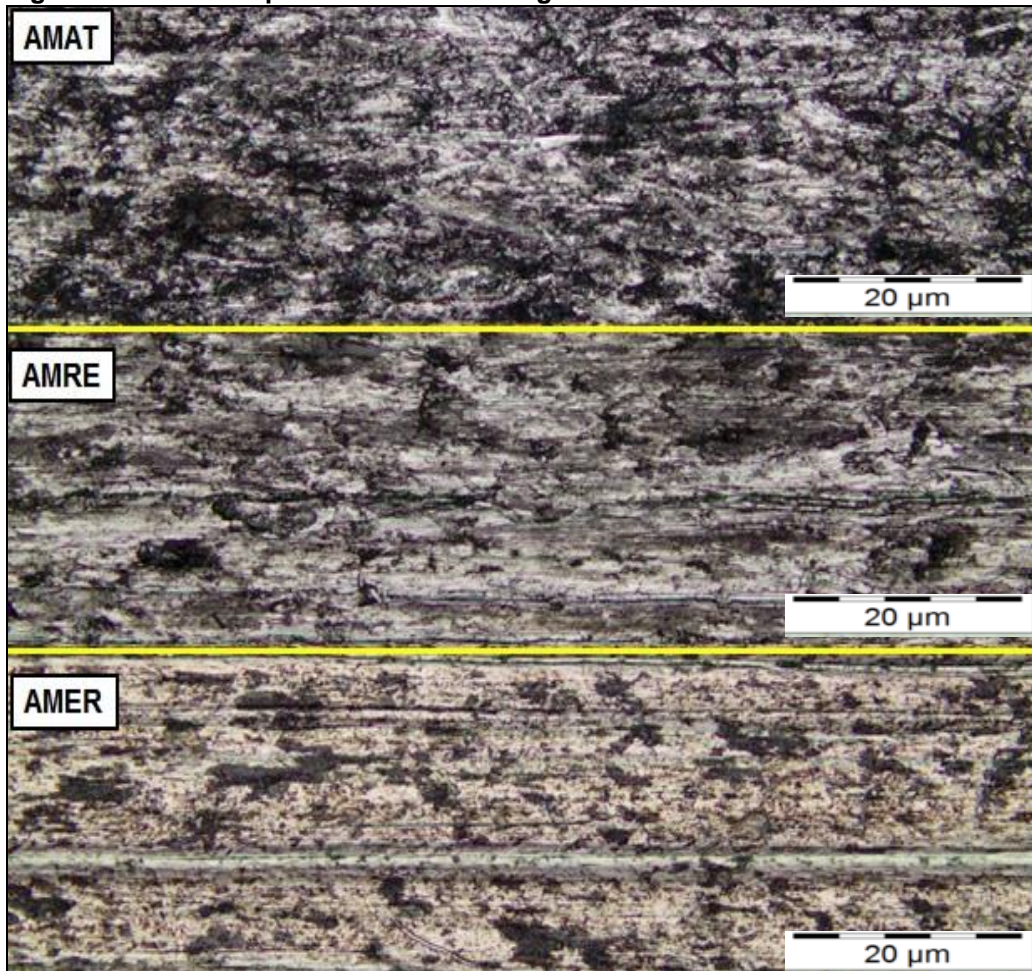
Fonte: Autoria Própria.

A amostra AMER apresentou uma trilha com riscamentos mais finos e com profundidades menores. A trilha da amostra AMRE tem riscos mais profundos e bem definidos e também houve a formação de picos e vales na região desgastada.

A amostra AMAT apresentou uma trilha com maior uniformidade na região desgastada, com riscos profundos e próximos entre si, também houve a formação de picos e vales na região da trilha de desgaste.

As trilhas de desgaste foram observadas em microscópio ótico com aumento de 20x, possibilitando uma análise mais detalhada da região desgastada como mostra a Figura 40.

Figura 40 - Microscopia das trilhas de desgaste.



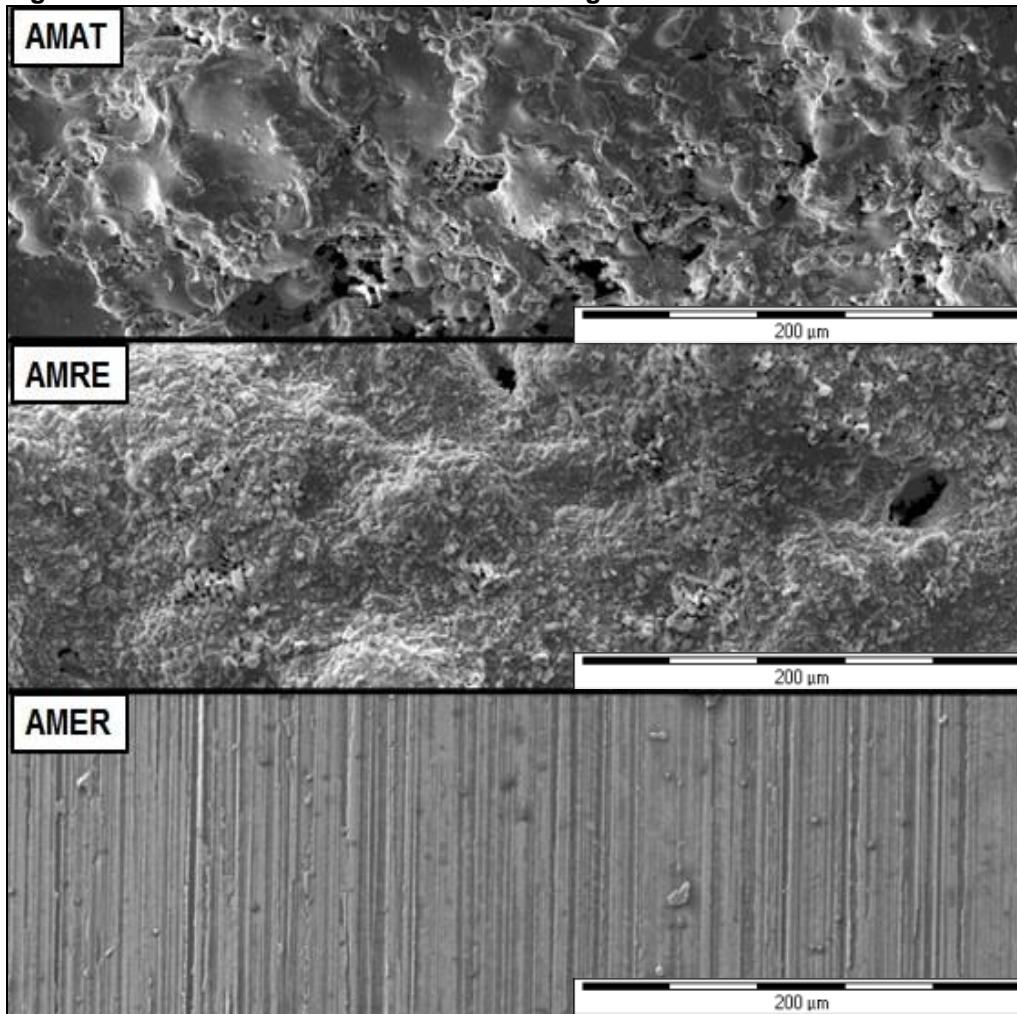
Fonte: Autoria Própria.

A microscopia da amostra AMAT não revelou riscos ao longo de sua extensão, o que se faz notar que o micromecanismo de desgaste predominante na amostra foi o microsulcamento, onde inicialmente as partículas foram deformadas plasticamente, produzindo uma grande quantidade de saliências, e, a ação interrompida do abrasivo provocou a perda de material da superfície. Na amostra AMRE, observa-se a ocorrência de um desgaste muito parecido com o ocorrido na amostra anterior (AMAT), assim, o mecanismo predominante nesse caso também é o microsulcamento ou, amassamento da superfície pelas partículas abrasivas.

A dureza elevada da amostra AMER, atribuiu uma maior resistência ao desgaste, sendo que, o mecanismo de desgaste atuante sobre a superfície da amostra foi o microcorte; por se tratar de uma superfície dura e não permitir grandes níveis de deformação plástica, o desgaste ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo, imprimindo na superfície riscos ao longo da trilha.

Para um detalhamento ainda melhor, as amostras de desgaste foram cuidadosamente limpas pelo processo de ultrassom e em sequência submetidas à análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV), com aumento de 500x como mostra a Figura 41.

Figura 41 - Análise via MEV das trilhas de desgaste.



Fonte: Autoria Própria.

As análises via MEV das trilhas de desgaste confirmam os micromecanismos predominantes em cada uma delas, onde é possível verificar com ainda mais nitidez as superfícies deformadas pelas partículas nas trilhas das amostras AMAT e AMRE e, ainda, verificar os riscos ao longo da trilha na amostra AMER.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e comparação com a literatura, através dos ensaios de Microdureza Vickers e desgaste por Roda de Borracha e das análises MO, MEV e EDS, conclui-se que:

O revestimento 40Fe30Ni30WC depositado pelo processo AT apresentou as menores durezas e microestrutura com maior heterogeneidade, além de menor resistência ao desgaste. As trilhas de desgaste analisadas via MO e MEV apresentaram como micromecanismo de desgaste predominante o microsulcamento.

O revestimento 40Fe30Ni30WC depositado pelo processo AT e refundido pelo processo TIG apresentou um aumento significativo de dureza, e uma melhora considerável na resistência ao desgaste mesmo ainda possuindo como micromecanismo de desgaste o microsulcamento. Isso indica que a diluição do revestimento no metal de base e a mudança na morfologia da microestrutura foram fatores fundamentais para a melhora das propriedades de resistência ao desgaste.

O revestimento obtido pelo eletrodo EH CR 70, depositado pelo processo ER, foi o que apresentou os maiores valores de dureza e a microestrutura com maior homogeneidade, além de o melhor resultado no ensaio de desgaste. A análise das trilhas de desgaste desse revestimento revelou que o micromecanismo predominante para o eletrodo foi o microcorte.

Se comparados ao eletrodo EH CR 70, todos os revestimentos AT apresentaram dureza e resistência ao desgaste inferior, sendo, o revestimento AT refundido o que apresentou o melhor resultado entre os revestimentos aspergidos.

No contexto dos revestimentos analisados, o revestimento produzido pelo eletrodo revestido comercial foi o que apresentou os resultados mais satisfatórios para o estudo proposto, dessa forma, o processo de soldagem ER continua sendo um dos mais indicados para a fabricação e recuperação das facas picadoras de cana-de-açúcar.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o desempenho de cada um dos revestimentos em campo;
- Avaliar a mistura 40Fe30Ni30WC utilizada na condição de cinco ou seis camadas com refusão pelo processo de soldagem a plasma e comparar com o eletrodo KS EH CR 70;
- Inserir Cromo na mistura dos pós para aspersão.

REFERÊNCIAS

- ASTM G65-00, 2001. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus.** Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, p. 247-259, 2001.
- BAPTISTA, A.L.B.; NASCIMENTO, I. A. Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste Depositado por Soldagem Utilizados na Recuperação de Elementos de Máquinas. **Spectru Instrumental Científico**, Rio de Janeiro, 2009.
- BELÉM, M. J. X.; FALS, H. C.; LIMA, C. R.C. Avaliação da Resistência à Oxidação de Camadas de Ligação de Revestimentos Utilizados em Barreiras Térmicas. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 479-488, 2015.
- BREZINA, P.; **Martensitic CrNi Steels with Low Carbon Content.** Steel castings research and trade association. Sheffield. 1980.
- BRITO, V.R.S.S. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Eletrodo a Arco Elétrico.** 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2010.
- BRU, R.J.B.W. **Avaliação Mecânica de Superfícies do Aço SAE 4144.** 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- BUCHANAN, V. E; SHIPWAY, P. H.; MCCARTNEY, D. G. Microstructure and Abrasive Wear Behaviour of Shielded Metal Arc Welding Hardfacings Used in the Sugarcane Industry. **Wear**, v. 263, p. 1 - 12, 2007.
- BUCHELY M.F., GUTIERREZ J.C., LEÓN L.M., TORO A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. **Wear**, v. 259, 2005.
- CARCELLER, R. C. **Influencia de los Parámetros del Régimen de Recargue en la Morfología de los Depósitos de Acero e Fundición Blanca al Cromo y su incremento en la Resistencia al Desgaste Abrasivo.** 154 p. Tese (Doutorado em Ciências Técnicas) - Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Faculdade de Engenharia Mecânica, República de Cuba, 2007.
- CASTRO, M.R.; CAVALER, L.C.C.; KEJELIN, N.Z.; COMELI, F.W., ROCHA, A.S. Revestimento WC Depositado por Aspersão Térmica (Hvof) como Alternativa ao Cromo Duro Eletrodepositado Aplicados em Equipamentos Hidráulicos. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 19, n. 2, p. 5 -10, jan. 2015.
- COPERSUCAR – Cooperativa de produtores de Cana-de-açúcar. **Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo.** www.copersucar.com.br. 2017.

DESHPANDEA, S.; SAMPATHA, T. S; ZHANG. H; Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings—Case study for Ni – Al. **Surface & Coatings Technology**, v. 200, 2006.

DOCE BRASIL. **Usina Produtora de Açúcar Mascavo**. <www.docebrasil.com.br>. Acesso em 15 de nov. 2015.

ESAB. **Eletrodos Revestidos OK**. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.

FANICCHIA F., AXINTE D. A., KELL J., MCINTYRE R., BREWSTER G., NORTON A.D. Combustion Flame Spray of CoNiCrAlY & YSZ coatings. **Surface & Coating Technology**, v. 315, abr. 2017.

FAUCHAIS, P.L.; HEBERLEIN, J. V.R., BOULOS, M., **Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part**. © Springer Science+Business. New York, 2014.

FOGAGNOLO, J.B. **Introdução a processos e metalurgia da soldagem**, Texto Guia da Disciplina de Soldagem da Graduação em Engenharia Mecânica da UNICAMP. Universidade de Campinas, 2011.

FOLTRAN, B.B. **Comparação dos revestimentos de superligas à base de cobalto (Co-Cr-W-C) depositadas por eletrodo revestido, plasma por arco transferido e laser**. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. **Wear**. v. 214, p. 139 – 146, 1998.

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

HARSHA, S.; DWIVEDI, D.K.; AGRAWAL, A. Influence of WC addition in Co–Cr–W–Ni–C flame sprayed coatings on microstructure, microhardness and wear behavior. **Surface & Coating Technology**, v. 201, mar. 2006.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 273 p. 1992.

KASSIM. S. A. Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys. **Wear**, v. 243, p 1- 8, ago. 2000.

KESTRA. **KST EH CR 70**. Data Sheet Kestra. rev. 5. 2017. Disponível em: <http://www.kestra.com.br/uploads/product/files/1059/DSEL_-_0008_-_KST_EH_CR_70.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2017.

KOTECKI, D. J.; OGBORN J. S. Abrasion Resistance of Iron Based Hardfacing Alloy. **Welding Journal**. p. 269 – 278, ago. 1995.

LABSOLDA. **LABORATÓRIO DE PROJETOS UFSC**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php>. Acesso em: 23 abr. 2018.

LIMA, A. C.; **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar**. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

LIMA, Carlos C; TREVISAN, Roseana. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2007.

LIU, J.; YANG, S.; XIA, W.; JIANG, X.; GUI, C. Microstructure and wear resistance performance of CuNiMn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles. **Journal of Alloys and Compounds**. Wuhan. 2015.

MARQUES P.V.; **Aspersão Térmica**, Infosolda, 2003.

MENEZES, D. D.; **Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional, em meio Cloreto**. 168 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico – Soldagem 1**. UFMG, Belo Horizonte, 54 p. 2008.

MOSELLI, P.C. **Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó**. 142 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

NASCIMENTO, M. N.; MARIANO, C.; PAREDES, R.S.C.; **Caracterização das propriedades da mistura de FeAl depositado como revestimento por aspersão térmica a chama**. Curitiba. Artigo ABPG. Universidade Federal do Paraná, 2007.

NOGUEIRA, A. M. P. e VENTURINI FILHO, W. G. **Aguardente de Cana**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Campus de Botucatu. Apostila. 71p. 2005.

O'BRAIAN R.L. **Welding Handbook: Welding Processes**. 8 ed. v.2. S.I.: American Welding Society. 1995.

OLIVIO, E. F. T.; **Avaliação de Ligas de Ni-Al Utilizadas como Revestimento Estáveis a Altas Temperaturas Depositadas por Aspersão Térmica à Chama Pó**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PADILHA, H.; **Desenvolvimento “In Situ” de Intermetálicos Ni-Al em Superfícies de Aço Inoxidável Aisi 304 Através da Aplicação por Aspersão Térmica de Mistura de Pós de Níquel e Alumínio.** 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PARANHOS, R. P. R. Especialista Fala da Importância da Soldagem para o Setor. **Jornal ProCana On Line.** 2003. Disponível em: <www.procana.com.br/index.html>. Acesso em: 26 de Abr. 2015.

PAREDES, R. S. C.; **Aspersão Térmica**, Texto Guia da Disciplina de Aspersão Térmica na Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPR (disponível na Biblioteca da UFPR-Centro Politécnico). Universidade Federal do Paraná, 2009.

PEREIRA, S. A.; **Desenvolvimento de Procedimento de Reparo por Soldagem em Aços Inoxidáveis Martensíticos com Metal de Adição Similar sem TTP.** 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

PLASMAC. **Soldagem com Eletrodo Revestido.** Disponível em: <<http://www.plasmac.com.br>>. Acesso em: 30 de Jan 2018.

POLIDO, R.S.; GALEGO, J.; **Estudo da microestrutura de revestimento duro aplicado nos equipamentos da indústria sucroalcooleira sujeito ao desgaste abrasivo.** Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

PRADEEP, G.R.C.; RAMESH, A.; PRASAD, B.D. A Review Paper on Hardfacing Process and Materials. **Internacional Journal of Engineering Science and Technology.** p. 6507 – 6510, 2010.

PRISCO, M. Revestimentos Protetores contra Desgaste. Soldagem de Manutenção. **ABS –ABRAMAN.** p. 231-284, 1993.

RIBEIRO, C.A.F.; BLUMER, S.A.G.; HORI, J.; **Fundamentos de Tecnologia Sucroalcooleira.** Piracicaba. Apostila. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz De Queiroz, 1999.

SANTOS, A. S.; FRANCO. A. A.; ALMEIDA, D. M. e PERTICARRARI, M. Soldagem na Indústria Sucroalcooleira. **Revista da Soldagem.** Ano I, n. 7, p. 20-26, 2005.

SAYMAN O., SEN F. , CELIK E. , ARMAN Y. Thermal stress analysis of Wc–Co/Cr–Ni multilayer coatings on 316L steel substrate during cooling process. **Materials and Design,** v. 30, 2008.

SPECTRU, INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA. **Catálogo de composição química dos aços.** Disponível em: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aco_carbono.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2017.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**, Butterworth Heinemann, 2. Ed. 744 p. 2001.

SUCHARSKI, G. B. **Estudo da Erosão por Cavitação sobre diferentes morfologias de Revestimentos De FeMnCrSiB aplicados por Aspersão Térmica Chama FS e HVOF com tratamento de shot peening**. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TREVISANI, E. F.; PAREDES, R. S. C.; AGUIAR, L. A.; SUCHARSKI, G. B.; PADILHA, H.; CARDOZO, M. A; CAPRA, A. R.; **Evaluation of NiAl Alloys Used as Resistant Coating Deposited by Powder Flame Spraying**. 21st Brazilian Congress of mechanical Engineering October 24-28, Natal, RN, Brazil. 2011.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. Ed 4, São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. **Soldagem**. 1. ed. São Paulo: Coleção Tecnologia SENAI, 1997.