

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

RAFAELA GUERGOLET SANCHES

**ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS DE FeMnCrSiB
APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

RAFAELA GUERGOLET SANCHES

**ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS DE FeMnCrSiB
APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ**

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

Orientador: Prof. Dr. Rogerio Akihide Ikegami

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S211 Sanches, Rafaela Guergolet

Estudo do desgaste abrasivo dos revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama a pó / Rafaela Guergolet Sanches. – 2018.
67 f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: Rogério Akihide Ikegami.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2018.
Bibliografia: p. 63-67.

1. Aspersão térmica. 2. Desgaste abrasivo. 3. Revestimentos. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Ikegami, Rogério Akihide, 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:
Simone Fidêncio de Oliveira Guerra – CRB-9/1276
Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676



Título da Dissertação N° 023:

“Estudo do Desgaste Abrasivo dos Revestimentos de FeMnCrSiB Aplicados por Aspersão Térmica Chama a Pó”.

por

Rafaela Guergolet Sanches

Orientador: **Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami**

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 09h do dia 23 de fevereiro de 2018. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante Da Costa
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Ricardo Breganon
(IFPR – Câmpus Jacarezinho)

Visto da coordenação:

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

Aos meus pais, Neide e Roberto.

AGRADECIMENTOS

Ao Meu Deus, Criador de todas as coisas, pelo dom da vida, por toda sabedoria e entendimento.

A Nossa Senhora Aparecida por cuidar dos meus passos.

Ao Meu Guardião São Miguel Arcanjo pela proteção.

Aos meus pais, Neide e Roberto, pelo exemplo de vida.

Ao meu irmão Roberto Júnior por sempre estar do meu lado.

Ao meu namorado, Bruno Henrique pela paciência, atenção e companheirismo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério pela aprendizagem e por ter acreditado em mim.

A amiga Prof^a. Dr^a. Emillyn por me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pelo conhecimento e dedicação para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

A minha amiga e companheira Jéssily, pela amizade e pelos momentos partilhados.

Ao PPGEM que possibilitou a concretização deste estudo.

A UTFPR-CP, Departamento de Mecânica, que disponibilizaram o uso de seus laboratórios para realização deste trabalho.

A UFPR, aos laboratórios LABATS (Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais) e LAMATS (Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais) por ajudarem a disponibilizar os equipamentos necessários para concretização deste estudo.

A UNESP – Bauru, pela realização de análises microscópicas em MEV e EDS.

A UDESC – Joinville, em especial ao Prof. Dr. Julio Cesar Milan, pela orientação e auxílio na realização dos ensaios de desgaste.

*Eis que estou convosco todos os dias,
até o fim dos tempos (Mateus 28:20).*

RESUMO

SANCHES, Rafaela G. **Estudo do desgaste abrasivo dos revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por Aspersão Térmica Chama a Pó.** 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

Revestimentos aspergidos são utilizados para as mais diversas finalidades, tais como resistência ao desgaste, ambientes corrosivos e altas temperaturas. Um dos maiores problemas enfrentados nas indústrias está relacionado ao desgaste abrasivo, que causa danos enormes em componentes e equipamentos, sendo um dos principais fatores de depreciação de capital e despesas de manutenção. Esta pesquisa tem como motivação investigar a viabilidade de aumentar a vida útil de sistemas e peças pela aplicação de revestimentos. O objetivo deste trabalho é fazer um estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos depositados por Aspersão Térmica Chama a Pó utilizando uma liga austenítica do tipo FeMnCrSiB com diferentes teores de boro, com pré e pós-aquecimento do substrato de aço carbono SAE 1020. As propriedades microestruturais formadas foram analisadas com a utilização de Microscopia Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), assim como a resistência à abrasão foi avaliada segundo procedimento estabelecido pela norma ASTM G-65. O aumento do teor de boro nos revestimentos foi acompanhado de maiores valores de microdureza, foi evidenciado efeitos na microestrutura, como também um desempenho inferior em relação ao desgaste abrasivo. De uma forma geral, a pesquisa mostrou resultados satisfatórios os quais possibilitam reduzir o problema de desgaste abrasivo.

Palavras-chave: Aspersão Térmica. Chama a pó. Desgaste Abrasivo. Revestimentos de FeMnCrSiB. Resistência ao desgaste.

ABSTRACT

SANCHES, Rafaela G. **Study of abrasive wear of FeMnCrSiB coatings applied by Powder Flame Spray**. 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Sprayed Coatings are used for various purposes, such as wear resistance, corrosive environments and high temperatures. One of the biggest problems faced in industries is related to abrasive wear, which can cause enormous damage to components and equipments, being one of the main factors of capital depreciation and maintenance costs. This research has as motivation to investigate the feasibility of increasing the useful life of parts and systems by the application of coatings. The objective of this work is to make a comparative study of the resistance to abrasive wear of coatings deposited by Powder Flame Spray using an austenitic alloy of FeMnCrSiB type with different boron contents, with pre- and post-heating of the of the SAE 1020 carbon steel substrate. The microstructural properties formed were analyzed using Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Analysis by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), as also the abrasion resistance was evaluated according to procedure established by ASTM G-65. The increase of the boron content in coatings was accompanied by higher values of microhardness, effects on the microstructure were evidenced, as also lower performance in relation to the abrasive wear. In a general way, a research showed satisfactory results that allow to reduce the problem of abrasive wear.

Key-words: Thermal Spray. Powder Flame Spray. Wear abrasive. FeMnCrSiB coatings. Wear resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos processos de desgaste pelo modo de desgaste.	21
Figura 2 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos.	22
Figura 3 - a) Goivagem; b) riscamento ou a baixa pressão; c) moagem ou a alta pressão.	22
Figura 4 - Mecanismos básicos de desgaste abrasivo.	23
Figura 5 - Esquema de aplicação do processo de Aspersão Térmica.	28
Figura 6 - Diagrama esquemático da morfologia de um revestimento aspergido.....	29
Figura 7 - Desenho esquemático do processo de Aspersão Térmica Chama com alimentação axial de pó.....	31
Figura 8 - Corpos de prova com superfície jateada.....	34
Figura 9 - Cabine de jateamento.	35
Figura 10 - Rugosímetro.	36
Figura 11 - Deposição pelo Processo Chama a Pó.....	36
Figura 12 - Equipamento de Aspersão Térmica Chama a Pó.	37
Figura 13 - Corpo de prova embutido.....	40
Figura 14 - a) Cortadora metalográfica; b) Prensa embutidora automática.....	40
Figura 15 - Equipamento de Microdureza Vickers.....	41
Figura 16 - Microscópio Ótico.....	42
Figura 17 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS acoplado.....	43
Figura 18 - Abrasômetro do tipo Roda de Borracha.....	44
Figura 19 - Pesagem das amostras.	45
Figura 20 - Microdureza da Secção Vertical das amostras aspergidas.....	48
Figura 21 - Característica geral dos revestimentos - a) CP1 e b) CP2 (ampliação 50x).	48
Figura 22 - Microestrutura do revestimento depositado (CP1).	49
Figura 23 - Microestrutura do revestimento depositado (CP2).	50
Figura 24 - Desenho esquemático do processo de deformação das partículas e localização dos óxidos.	51
Figura 25 - a) - MEV do revestimento CP1 e b) EDS.	53
Figura 26 - a) - MEV do revestimento CP2 e b) EDS.	54
Figura 27 - Desgaste das amostras pelo Abrasômetro Roda de Borracha.	55
Figura 28 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras CP1.....	56
Figura 29 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras CP2.....	57
Figura 30 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras de Aço SAE 1020 sem revestimento.....	58
Figura 31 - Representação gráfica dos resultados de perda de massa das amostras ensaiadas.....	59
Figura 32 - Representação gráfica do desgaste médio das amostras ensaiadas. ...	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos materiais para revestimento em função da composição química.....	24
Tabela 2 - Classificação dos materiais para revestimento em função do teor de elementos de liga.	25
Tabela 3 - Materiais para revestimento em função do teor de elementos de liga e aplicação.	26
Tabela 4 - Composição química nominal da liga (% em peso).....	33
Tabela 5 - Composição química do aço SAE 1020.	34
Tabela 6 - Parâmetros empregados no jateamento abrasivo das amostras.	35
Tabela 7 - Variáveis adotadas no processo de revestimento.	37
Tabela 8 - Identificação das amostras.....	39
Tabela 9 - Parâmetros de teste para ensaio de desgaste.....	45
Tabela 10 - Rugosidades das amostras após Jateamento Abrasivo.....	46
Tabela 11 - Microdureza na secção horizontal.....	46
Tabela 12 - Composição das fases presentes (CP1).	53
Tabela 13 - Composição das fases presentes (CP2).	54
Tabela 14 - Resultados de perda de massa apresentada pelos corpos de prova CP1.	56
Tabela 15 - Resultados de perda de massa apresentada pelos corpos de prova CP2.	57
Tabela 16 - Resultados de perda de massa apresentada pelo Aço SAE 1020 sem revestimento.....	58
Tabela 17 - Perda de massa média (em gramas) das amostras ensaiadas.....	59

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASP	Aspersão térmica por arco elétrico, <i>Arc Spray Process</i>
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
CP	Cornélio Procópio
CVD	Chemical vapor deposition
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
FS	<i>Flame Spray</i>
HVOF	Aspersão térmica de alta velocidade, <i>High velocity oxy-fuel</i>
LABATS	Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais
LAMATS	Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscopia Ótica
PTA	Soldagem por plasma de arco transferido, <i>Plasma Transferred Arc</i>
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Boro
Cr	Cromo
Fe	Ferro
HV	Dureza Vickers
Mn	Manganês
Ra	Desvio médio aritmético
RSm	Espaçamento médio das irregularidades
Ry	Altura máxima das irregularidades
Rz	Altura das irregularidades em dez pontos
Si	Silício

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Desgaste	18
2.1.1 Classificação dos tipos de desgaste	19
2.1.1.1 Desgaste abrasivo.....	20
2.2 Materiais para revestimento resistentes ao desgaste	24
2.3 Aspersão Térmica	27
2.3.1 Aspersão Térmica Chama a Pó (<i>Flame Spray</i> - FS)	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais	33
3.1.1 Pós para deposição.....	33
3.1.2 Substratos	34
3.2 Métodos	34
3.2.1 Jateamento Abrasivo.....	34
3.2.2 Rugosidade	35
3.2.3 Deposição	36
3.2.4 Pré-aquecimento	38
3.2.5 Pós-aquecimento	38
3.3 Identificação das Amostras	39
3.4 Caracterização	40
3.5 Análises e Ensaio	41
3.5.1 Ensaio de Microdureza Vickers	41
3.5.2 Microscopia Ótica	41
3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	42
3.5.4 Ensaio de desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Medição da Rugosidade do substrato	46

4.2 Microdureza Vickers.....	46
4.3 Microscopia Ótica	48
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	52
4.5 Ensaio de desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha	55
5 CONCLUSÕES	61
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias, o desgaste é um fenômeno que pode causar danos enormes em componentes e equipamentos. Segundo Gregolin (1990), o fenômeno do desgaste atua nos custos devido às necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas, como também pelas limitações na produção devido a equipamentos deteriorados, além de pausas nas linhas de produção muitas vezes inesperadas.

O desgaste pode ser definido como a degradação da superfície do equipamento ou do componente, normalmente envolve a remoção progressiva de materiais, como consequência de processos. De todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos encontrados na indústria em geral, sendo apontado como o tipo de desgaste mais rígido e violento (EYRE, 1978).

Atualmente, devido à evolução tecnológica é possível proteger de modo eficaz um determinado componente ou uma superfície exposta a qualquer tipo de desgaste, por meio de um revestimento (ZIEDAS; TATINI, 1997).

A possibilidade de modificar a superfície de um material aplicando revestimentos constituintes de materiais nobres e resistentes para aumentar a sua vida útil, tornou-se objeto de estudo muito importante e vantajoso, sendo possível empregá-los nas mais diversas áreas de aplicação, potencializando também a recuperação de partes danificadas no ambiente industrial (LIMA; TREVISAN, 2007).

Os revestimentos superficiais diferem de tratamentos superficiais, que adicionam pouca ou quase nenhuma massa à superfície (filmes finos). Os revestimentos são considerados espessos, maiores que 10 μm e podem ser aplicados por diversas técnicas: deposição química de vapor (CVD - *chemical vapor deposition*), deposição física de vapor (PVD - *physical vapor deposition*), eletrodeposição (*electrodeposition*), soldagem (*welding*), cladeamento (*cladding*) e Aspersão Térmica (*thermal spray*) (LIMA; TREVISAN, 2007).

Revestimentos termicamente aspergidos têm sido usados intensivamente nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia, e particularmente aeroespacial. Na questão de manutenção, muitos gastos têm diminuído com o uso do processo de Aspersão Térmica, usado tanto em oficina

como no campo, no revestimento de estruturas e partes de equipamentos, com economia de tempo e recursos (MARQUES, 2003).

A seleção do tipo de revestimento e a liga a ser depositada dependem de diversos fatores, como: condições de operação, características do metal base e da liga, relação custo/benefício, despesas de processamento, meio ao qual será submetido, aderência do material ao substrato.

O processo de Aspersão Térmica garante facilidade de deposição e custo adequado comparado com outras técnicas de proteção de materiais, de modo a obter revestimentos com elevada aderência e baixa porosidade (LIMA; TREVISAN, 2007; PAREDES, 1998; SCHIEFLER et al, 2002).

Uma das maneiras para minimizar o desgaste é a seleção dos materiais adequados para cada aplicação. Portanto, é necessário realizar ensaios que permitam avaliar a resistência ao desgaste dos materiais, de modo a relacioná-lo com diversos fatores como composição, microestrutura e propriedades mecânicas (GÓMEZ; FRANCO; SINÁTORA, 2009).

O presente trabalho visa analisar e caracterizar os revestimentos de FeMnCrSiB com diferentes teores de Boro, depositados pelo processo de Aspersão Térmica Chama a pó, os quais foram submetidos a análises de Microscopia Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura e aos ensaios de Microdureza Vickers e desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha para a avaliação da resistência ao desgaste do revestimento.

1.2 Justificativa

O desgaste de peças e/ou equipamentos ocorre de forma progressiva, esse fato influencia na eficiência da produção, o que leva à necessidade de realizações de paradas para a substituição ou reparação do item deteriorado. Para minimizar esse problema, novas técnicas de revestimento e ligas estão sendo estudadas e desenvolvidas, pois com a aplicação desses processos torna-se possível a diminuição do desgaste e, conseqüentemente, o aumento da vida útil desses componentes, que reflete diretamente na diminuição das paradas obrigatórias, aumentando assim a produtividade das indústrias e diminuição dos custos.

A busca de materiais resistentes ao desgaste e a possibilidade de proteção por revestimentos superficiais através da técnica de Aspersão Térmica são de grande interesse, devido ao fato desses revestimentos modificarem apenas as propriedades superficiais do componente, sem ocorrer uma modificação do substrato revestido, como também não ocorrência de ciclos térmicos com elevado aquecimento e resfriamento do material de base, sendo assim, o substrato assegura as suas propriedades e alcança melhores resultados em relação à superfície (LUZIN; VALAREZO; SAMPATH, 2008; SAMPATH et al., 2004; SUCHARSKI, 2016; VALAREZO et al., 2010).

A técnica de Aspersão Térmica Chama a Pó proporciona um custo significativamente menor quando comparado a outros processos de Aspersão Térmica (PAREDES, 2009), além disso, neste processo é possível aplicar ligas em forma de pó, que podem ser obtidas a partir da mistura de pós-elementares, ou seja, não tem limitações devido à inviabilidade de fabricação de arames ou varetas de determinados materiais ou ligas. Porém, os revestimentos obtidos por esse processo têm menor resistência adesiva e resistência coesiva e maior porosidade, isso ocorre pela menor velocidade alcançada pelas partículas (SUCHARSKI, 2016).

As propriedades mecânicas dos revestimentos aspergidos são diretamente dependentes do material depositado e da morfologia resultante (SUCHARSKI, 2016). Um bom revestimento, normalmente, pode ser caracterizado por uma boa adesão, compatibilidade com o substrato e baixa porosidade (PAREDES, 1998). Desta maneira, é possível aumentar ou diminuir a relação entre a quantidade de material depositado, os poros e óxidos, alterando o processo de aplicação, como também, estudar e modificar os parâmetros do processo usado com finalidade de obter melhores resultados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é obter revestimentos através da deposição da liga de FeMnCrS-B pelo processo de Aspersão Térmica Chama a Pó, bem como analisar através dos resultados obtidos o comportamento dos revestimentos quanto às propriedades microestruturais e mecânicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral, alguns objetivos específicos foram observados, entre os quais:

- Estudar o processo de Aspersão Térmica Chama a Pó e a liga FeMnCrSiB, de modo a obter a compreensão dos seus fundamentos e de suas generalidades;
- Realizar uma busca bibliográfica para verificar resultados em pesquisas;
- Efetuar a escolha dos parâmetros para Aspersão Térmica Chama a Pó, tendo em vista resultados obtidos em trabalhos afins, de modo a obter melhores propriedades e resultados;
- Realizar a deposição da liga FeMnCrSiB pelo processo de Aspersão Térmica Chama a Pó;
- Caracterizar as amostras revestidas através de diferentes técnicas;
- Comparar os resultados obtidos com a liga em proporções diferentes do elemento Boro;
- Viabilidade do revestimento;
- Analisar os resultados e listar conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste

As definições de desgaste são apresentadas de diversas formas na literatura, porém apresentam o mesmo conceito final. O fenômeno do desgaste pode ser definido como a deterioração, não intencional motivada pela interação do material com o meio no qual foi inserido (EYRE, 1978).

O desgaste é, de maneira geral, o deslocamento indesejável de material de determinada superfície. Nos metais, esse processo pode advir pelo contato com outros metais, sólidos não metálicos, líquidos em movimento, ou ainda partículas sólidas ou partículas de líquido transportadas em um fluxo gasoso, o que resulta em dano que ocorre na superfície de um sólido devido ao movimento relativo entre a superfície e uma ou mais substâncias em contato com ela. Pode ainda ser definido como a perda progressiva de material da superfície considerada (ZIEDAS; TATINI, 1997).

O desgaste de sistemas e peças acaba gerando custos em relação à manutenção e reposição, o que pode representar uma razão da queda da produção e aumento de despesas (GREGOLIN, 1990).

Entretanto, quando o desgaste se localizar em apenas uma determinada peça ou em parte dela, poderá neste caso, ser reparado com a remoção da superfície degradada, ou ainda pode ser solucionado por um revestimento protetor, capaz de recuperar a peça, atuar como prevenção ao desgaste, e dependendo da liga e do processo utilizado, obter um custo final de reparação relativamente baixo (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2009; MOSELLI, 2013).

São vários os fatores que provocam o desgaste de sistemas e peças como, por exemplo: função da peça, exigência a qual é submetida, tipo de abrasivo, além das propriedades do material (MOSELLI, 2013).

2.1.1 Classificação dos tipos de desgaste

A dificuldade de classificar os tipos de desgastes encontrados na literatura é devido à complexidade dos fatores envolvidos, portanto, procura-se estabelecer classificações que facilitem o estudo do fenômeno e sua prevenção.

Segundo Batista e Nascimento (2009), para maior facilidade de análise e prevenção, procuram-se geralmente identificar o(s) mecanismo(s) predominante(s) de remoção de material. Para tanto, os tipos gerais de desgaste podem ser classificados como:

- a) Desgaste por Abrasão – ocasionado por partículas abrasivas duras sob tensão, deslocando-se sobre a superfície;
- b) Desgaste por Adesão ou Fricção – resultante do atrito metal - metal, quando superfícies ásperas deslizam entre si;
- c) Desgaste por Erosão – ocorre devido ao choque contra a superfície, de partículas sólidas ou gotas líquidas, presentes em correntes de fluídos;
- d) Desgaste Corrosivo – que envolve a ocorrência de reações químicas superficiais no material, além das ações mecânicas de desgaste;
- e) Desgaste por Cavitação – está associado à formação e implosão de bolhas gasosas em correntes de fluídos, na interface líquido - metal, devido à variação súbita de pressão ao longo do percurso;
- f) Desgaste por impacto – ocasionado por choques ou cargas aplicadas verticalmente sobre a superfície.

O desgaste dificilmente é o resultado de um único mecanismo atuante, há situações no qual um tipo de desgaste muda para outro ou onde dois ou mais mecanismos operam juntos; como por exemplo, os cavacos produzidos por desgaste adesivo causarem desgaste abrasivo (EYRE, 1978).

Como visto, apesar dos vários tipos, o desgaste abrasivo é o maior responsável por danos em peças e equipamentos, cerca de 50% dos casos encontrados nas indústrias e será discutido com maiores detalhes a seguir (EYRE, 1978).

2.1.1.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é o tipo de desgaste que acontece com maior frequência no ambiente industrial e pode ser definido como o desgaste que ocorre quando partículas duras angulares ou fragmentos duros penetram na superfície do metal ou substrato, em relação à qual estão em movimento e, subsequentemente, remove material, por meio de vários mecanismos que dependem da natureza do sistema. O dano é frequentemente descrito como ranhura, entalhe ou goivagem, dependendo de sua severidade (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com Baptista e Nascimento (2009), o desgaste abrasivo ocorre quando as partículas não metálicas escorregam sobre partes metálicas, acompanhada de forte pressão, ocasionando por deslocamento ou amassamento, a retirada do metal.

Alguns fatores podem acelerar o processo de desgaste sendo esses: propriedades do abrasivo, fatores externos (carga, velocidade), propriedades mecânicas do metal e estrutura metalúrgica (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

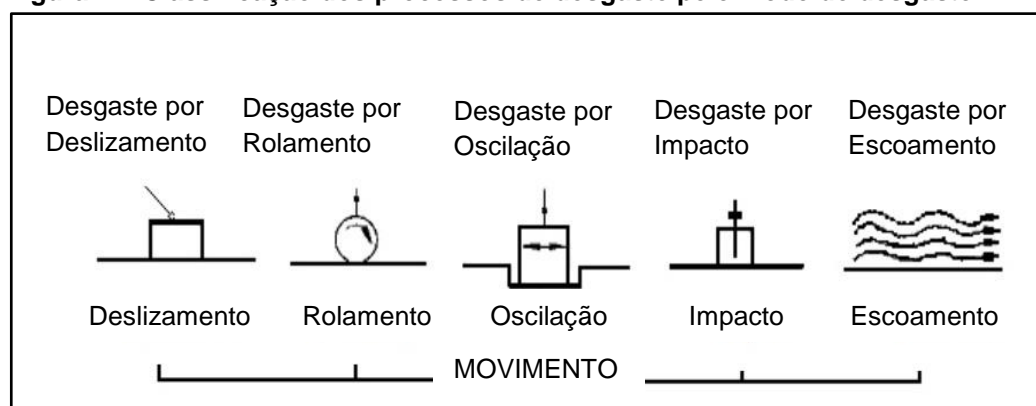
Em um componente, o desgaste na maioria das vezes, leva a perda de eficiência, causa vibração e desalinhamento, além disso, algumas falhas causadas por desgaste podem levar a fratura, o que normalmente pode danificar o equipamento (LEITE; MARQUES, 2009).

No combate à abrasão não é suficiente empregar materiais mais duros do que os materiais abrasivos, sendo assim, como melhor solução é necessário levar em consideração os elementos que compõem o metal sujeito à abrasão e o tamanho dos respectivos grãos, como também as causas, muitas vezes de grande importância (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2009).

A razão do desgaste depende do grau de penetração da partícula abrasiva na superfície metálica, sendo assim está relacionada com a dureza do material (ZIEDAS; TATINI, 1997).

O desgaste abrasivo pode ser classificado pelos modos de desgaste que podem variar entre deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e escoamento. A Figura 1 apresenta esquematicamente os diferentes tipos de ações na interface de um corpo sólido, em função do movimento das interfaces e/ou das partículas abrasivas.

Figura 1 - Classificação dos processos de desgaste pelo modo de desgaste.

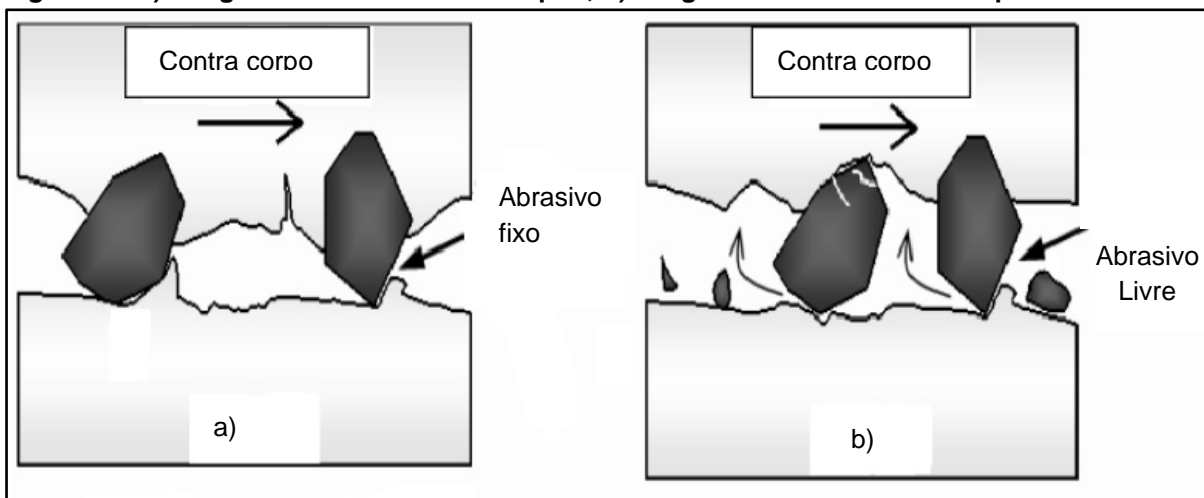


Fonte: Zum Gahr (1987).

O desgaste abrasivo é tipicamente classificado de acordo com o tipo de contato e com o ambiente de contato. Os tipos de contato incluem desgaste a dois corpos ou três corpos (Figura 2). Utilizando-se desta definição, a amostra é o “primeiro corpo”, o contra-corpo é o “segundo-corpo” e o abrasivo é o “terceiro corpo” (SILVA; OTUBO, 2010). A abrasão a dois corpos acontece quando uma aspereza dura da superfície de contato (contra corpo) ou uma partícula rigidamente fixada a esta desliza sobre a superfície de desgaste como uma ferramenta de corte, sendo caracterizado pela presença de sulcos ou ranhuras lineares na direção de deslizamento, por exemplo, em máquinas de minério. No desgaste abrasivo a três corpos a partícula está livre para rolar (assim como para deslizar) na região do contato, neste caso, geralmente a superfície de desgaste apresenta uma topografia aleatória, sem características de direcionalidade, como ocorre, por exemplo, em equipamentos de trituração de minério ou de forma imprevista, quando do ingresso de partículas estranhas para dentro dos mancais (NIKKEL, 2016; ALENCAR, 2009; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005; TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

Um exemplo de abrasão a dois corpos é o desgaste provocado no sistema amostra-lixia (pino contra lixa ou pino contra disco, por exemplo). No caso do desgaste a três corpos as partículas abrasivas estão livres, o que permite o rolamento destas entre a amostra e o contra-corpo que como consequência, consomem apenas parte do tempo atuando no riscamento da superfície, por exemplo, roda de borracha (SILVA; OTUBO, 2010).

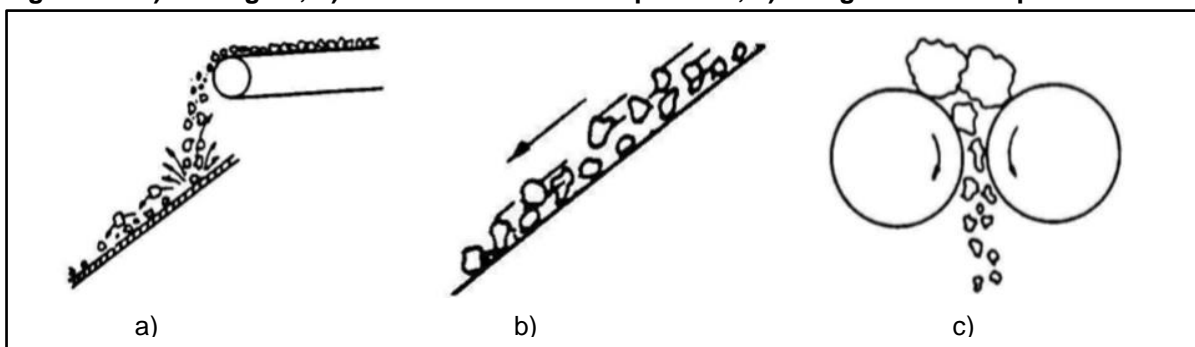
Figura 2 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos.



Fonte: Gates (1998).

As características e dimensões das partículas, a maior ou menor pressão de esforço ou amassamento sobre as superfícies metálicas abrasadas determinam a classificação da abrasão, esta que é dividida em três tipos: goivagem, riscamento e moagem, conforme ilustrado na Figura 3 (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Figura 3 - a) Goivagem; b) riscamento ou a baixa pressão; c) moagem ou a alta pressão.



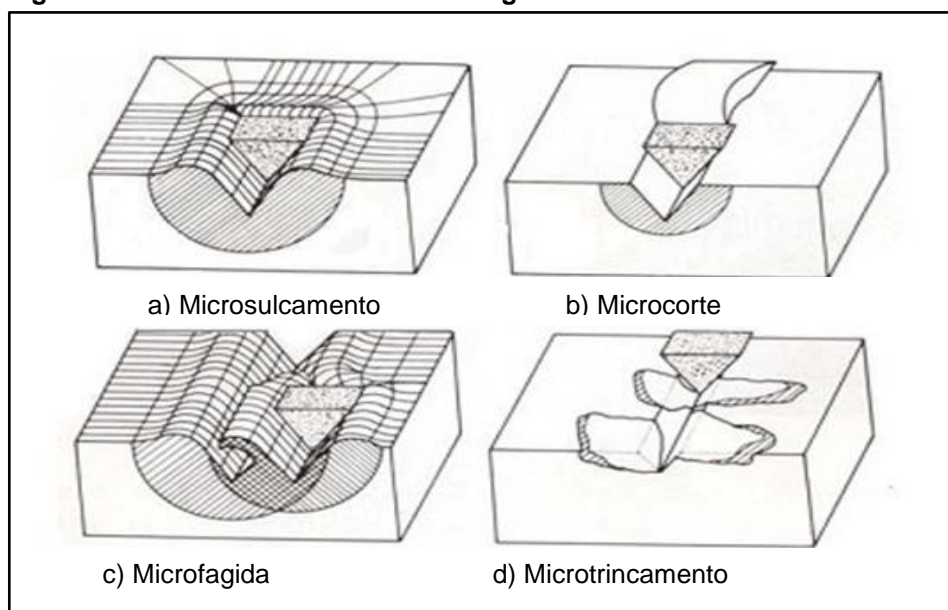
Fonte: Davies; Bolton (1980).

A goivagem ocorre quando partículas abrasivas de dimensões grandes agem sobre a superfície metálica, formando sulcos profundos; este mecanismo envolve a remoção de fragmentos relativamente grandes da superfície pela ação do material abrasivo grosseiro. A abrasão por riscamento ou a baixa pressão é o deslocamento com tensões menores do que a tensão de compressão do abrasivo, o material é removido da superfície em pequenos ângulos de incidência por processo de risco ou micro-usinagem. A abrasão por moagem ou a alta pressão acontece quando as partículas abrasivas são presas entre duas superfícies metálicas sob

carga, a alta tensão na fragmentação do abrasivo na moagem evidencia um sistema em que a resistência à compressão do abrasivo é excedida (ZIEDAS; TATINI, 1997).

O desgaste abrasivo também é classificado quanto ao aspecto da superfície desgastada (micro mecanismo), em: a) microsulcamento, b) microcorte, c) microfadiga e d) microtrincamento, conforme mostrado na Figura 4. No microsulcamento a perda de material ocorre devido a muitas partículas abrasivas agirem simultaneamente e sucessivamente, formando um amassamento à frente da partícula abrasiva (MULHEARN; SAMUELS, 1962). No microcorte ou microrrisamento, as condições de desgaste não admitem grandes níveis de deformação plástica do material, ocorre à perda de massa devido ao corte do material pelo abrasivo. A microfadiga ocorre quando um material é sulcado para o lado contínuo e repetidamente, devido à passagem de consecutivas partículas abrasivas, até que se quebre devido a algum ciclo de fadiga. O microtrincamento acontece quando tensões muito concentradas são impostas pelas partículas abrasivas, ou quando se está empregando um material abrasivo mais rígido/frágil, que gera fraturas na superfície de contato com posterior destacamento de fragmentos (COLOMBO; LAROSA; PINTO, 2009; SILVA; OTUBO, 2010; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 4 - Mecanismos básicos de desgaste abrasivo.



Fonte: Mulhearn; Samuels (1962).

2.2 Materiais para revestimento resistentes ao desgaste

A importância e a variedade no campo de revestimento têm resultado em uma grande quantidade e variedade de ligas, tornando cada vez mais dificultosa a seleção do material mais resistente. A classificação pode ser baseada em vários fatores como: dureza, composição, condições de serviço em testes específicos; sendo assim, o mecanismo mais utilizado é uma combinação entre composição química e estrutura do metal depositado. A seleção de uma liga para revestimento é primeiramente ordenada pelo tipo de desgaste e pelos custos. Entretanto, outros fatores também devem ser considerados, tais como: metal de base, processo de deposição, resistência ao impacto, desgaste, corrosão, oxidação e requerimentos térmicos (ZIEDAS; TATINI, 1997).

A Tabela 1 indica uma classificação dos materiais para revestimento em função da composição química, divididos em cinco classes (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

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

Denominação	
Classe 1	Aços baixa e média liga 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: Adaptado de Wainer; Brandi; Mello (1992).

Outra classificação apresentada na Tabela 2 mostra os materiais para aplicação em revestimento em cinco grandes classes, em função do teor total de elementos de liga (além do ferro). A escolha de uma liga específica dependerá da aplicação e do tipo de processo a ser utilizado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

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
Materiais ferrosos de baixa liga	
1A 2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B 6 a 12	
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
3A 25 a 50	Cr, Ni, Mo
3B 25 a 50	Cr, Mo
3C 25 a 50	Co, Cr
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
Carbonetos	
5 75 a 96	WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica

Fonte: Adaptado de Baptista; Nascimento (2009).

De acordo com Batista; Nascimento (2009), na Tabela 2 a resistência ao desgaste e o custo de cada classe aumentam com o número do grupo:

As ligas do grupo 1A são aços de baixo teor de liga, quase sempre tendo cromo como principal elemento de liga. As ligas ferrosas do subgrupo 1B são semelhantes às do grupo 1A. São mais baratas que as outras ligas de revestimento e muito empregadas nos casos onde se necessita da usinabilidade e de apenas um aumento moderado da resistência ao desgaste.

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 muito aumentada pelo encruamento.

Os materiais de grupo 3 são caracterizados 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.

O grupo 4 compreende as ligas à base de cobalto e à base de níquel. 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. Mantêm durezas elevadas até cerca de 650°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem de 875°C. 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. Mais recentemente, outros carbonetos, principalmente titânio, tântalo e cromo, passaram a ser usados com resultados satisfatórios. 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.

Uma classificação dividindo os materiais para revestimento em 4 categorias é apresentada por Pradeep; Ramesh; Prasad (2010) na Tabela 3. 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, considerando em alguns casos suas aplicações.

Tabela 3 - Materiais para revestimento em função do teor de elementos de liga e aplicação.

Categoria	Teor total de elementos de liga (%)
Materiais ferrosos de baixa 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 e à 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 corrosão e oxidação, baixo coeficiente de atrito. Aplicadas em condições de elevadas temperaturas – em torno de 500° C 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: Adaptado de Pradeep; Ramesh; Prasad (2010).

Comparando as Tabelas 1, 2 e 3 verifica-se que as divisões apresentadas são as mesmas. Com relação à quantidade de elementos de liga, a Tabela 2 mostra-se mais esclarecedora, sendo assim, é necessário uma análise da aplicação e dos processos disponíveis, para uma seleção mais adequada da liga.

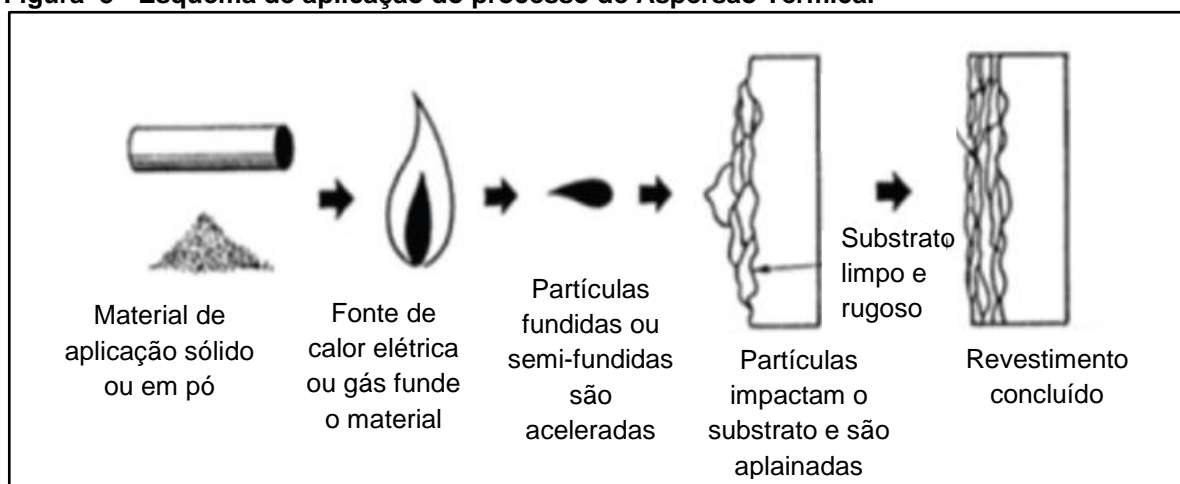
2.3 Aspersão Térmica

O desenvolvimento da tecnologia de Aspersão Térmica baseia-se na necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, devido ao elevado custo da reposição de componentes associado às vantagens de se recuperar peças as quais seriam substituídas. Dessa forma, sistemas e peças são projetados a fim de operar de maneira confiável e satisfatória economicamente tanto na fabricação quanto na manutenção (PAREDES, 1998).

O objetivo pelo qual se aplica a técnica de Aspersão Térmica em um material é a proteção que esse tipo de processo proporciona ao substrato que o recebe, podendo ser essa proteção contra o desgaste abrasivo, erosivo, fadiga superficial e corrosão (MARANHO, 2006).

A técnica de Aspersão Térmica (Figura 5) consiste no depósito em um substrato devidamente preparado utilizando partículas finamente divididas, sendo estas metálicas ou não, na condição fundida ou semi-fundida, formando uma camada superficial. O calor necessário para operação é gerado na tocha de aspersão e pode decorrer da queima de um gás combustível, da geração de um arco elétrico ou somente do aquecimento do gás. As partículas aquecidas são aceleradas por um gás comprimido, confinadas num feixe, e atiradas ao substrato. Ao se chocarem, as partículas se deformam e formam finas panquecas, que se conformam e aderem às irregularidades superficiais e entre si. Com o prosseguimento do processo, as partículas se resfriam, formando um revestimento com estrutura lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidades (LIMA; TREVISAN, 2007; PAREDES, 1998; PUKASIEWICZ, 2008; SULZER, 2012; TAKIMI, 2004).

Figura 5 - Esquema de aplicação do processo de Aspersão Térmica.



Fonte: Lima;Trevisan (2007).

No momento do contato das partículas com o substrato, é transferida uma alta energia cinética e térmica, que acaba gerando uma transferência de calor que, caso o substrato esteja adequadamente preparado, pode facilitar à difusão de alguns dos constituintes do material aspergido para o substrato, como também até a formação de ponto de microsoldagem, isto pode ser melhorado ainda mais quando se utiliza o pré-aquecimento do substrato (PAREDES, 1998; PUKASIEWICZ, 2008; SUCHARSKI, 2012, 2016).

Diversos materiais podem ser depositados por Aspersão Térmica, como: a maioria dos metais e suas ligas, óxidos, hidretos e boretos, carbonatos, materiais cerâmicos; os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeira (LIMA; TREVISAN, 2007). Entretanto, uma desvantagem da técnica de Aspersão Térmica está ligada a dificuldade de deposição de revestimentos em peças com geometrias complexas, pois a superfície a ser revestida deve ser totalmente visível pela tocha ou pistola de aspersão (ALMEIDA, 2005).

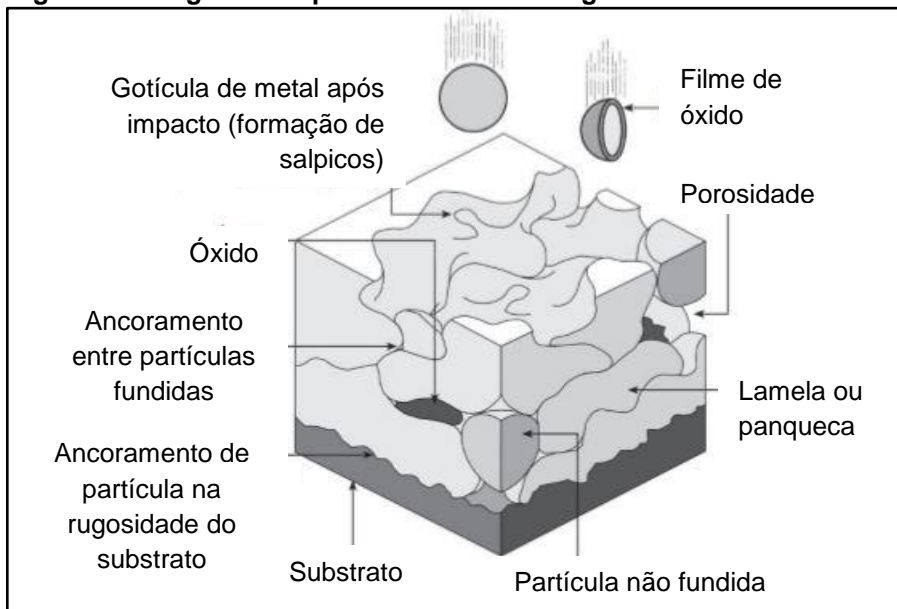
Há uma grande variedade de matéria-prima utilizada para deposição, podendo estar na forma de pós, arames ou varetas, a forma de aquecimento do material pode ser por combustão ou eletricidade, a forma de aceleração das partículas pode ser por ar comprimido ou um gás inerte (SCHIEFLER FILHO, 2004). Ainda, pode haver algumas alterações para um mesmo processo, como por

exemplo, alimentação axial ou radial de pó, deposição em atmosfera normal ou sob vácuo (LIMA, 2001).

Pawlowski (2008) ressaltou que a ligação ou adesão entre revestimento e substrato pode ser mecânica, química e/ou metalúrgica ou uma combinação dessas e é influenciada por vários fatores, como: material do revestimento, condição do substrato, rugosidade, limpeza, temperatura da superfície a ser revestida antes e durante o processo e velocidade de impacto das partículas. Dependendo das condições do procedimento empregado durante o processo de aspersão, os revestimentos são produzidos com uma grande variedade de propriedades microestruturais (PAREDES, 1998).

De uma maneira geral, independente do material que compõe um revestimento aspergido, a morfologia é determinada pela formação estrutural (de lamelas) do revestimento (microconstituintes), que é composta pelas partículas aspergidas deformadas (panquecas), salpicos (respingos), óxidos e porosidade (AWS, 1985; SUCHARSKI, 2016). A Figura 6 mostra um desenho esquemático da morfologia característica de revestimentos produzidos por Aspersão Térmica, com lamelas, poros e óxidos.

Figura 6 - Diagrama esquemático da morfologia de um revestimento aspergido.



Fonte: Sucharski (2016).

As características microestruturais dos revestimentos, como também as propriedades mecânicas, são propriamente influenciadas pela limpeza da superfície,

rugosidade e aquecimento do substrato (pré e/ou pós-aquecimento), sobretudo pelas magnitudes das energias térmica e cinética transferidas às partículas durante a aspersão, sendo assim as partículas resultam propriamente do tipo de processo utilizado e dos parâmetros selecionados (LIMA; TREVISAN, 2007). Ou seja, a variação de energia da chama ou do arco, a velocidade imposta às partículas, a taxa de deposição e as condições da preparação do substrato possibilitam diferentes graus de desempenho, pois alteram as características do revestimento obtido (SUCHARSKI, 2016).

Normalmente, nos processos de Aspersão Térmica de uso industrial, as distâncias de projeção das partículas variam de 100 até 300 mm e para obter uma aderência adequada ao substrato esse deve ter um grau de limpeza (Sa3), segundo a norma NACE RMN – 01/70 (PAREDES, 1998). Para obter o grau Sa3, quando o corpo de prova for examinado a olho nu, a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis e também da carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas. Na Aspersão Térmica, a limpeza é obtida por meio do jateamento abrasivo, permitindo com isso obter no substrato a limpeza e rugosidade, as quais permitem o ancoramento mecânico das partículas no momento do impacto (PADILHA, 2011).

Paredes (1998) salienta que, para a seleção do processo de deposição e do material, devem ser conhecidas as propriedades da superfície e do desempenho que a peça deve ter em função do tipo de desgaste ou corrosão presente. Dependendo da aplicação, além da escolha adequada dos materiais e dos processos, devem-se produzir camadas aspergidas com alto grau de aderência e com baixa porosidade para obter resultados satisfatórios.

2.3.1 Aspersão Térmica Chama a Pó (*Flame Spray* - FS)

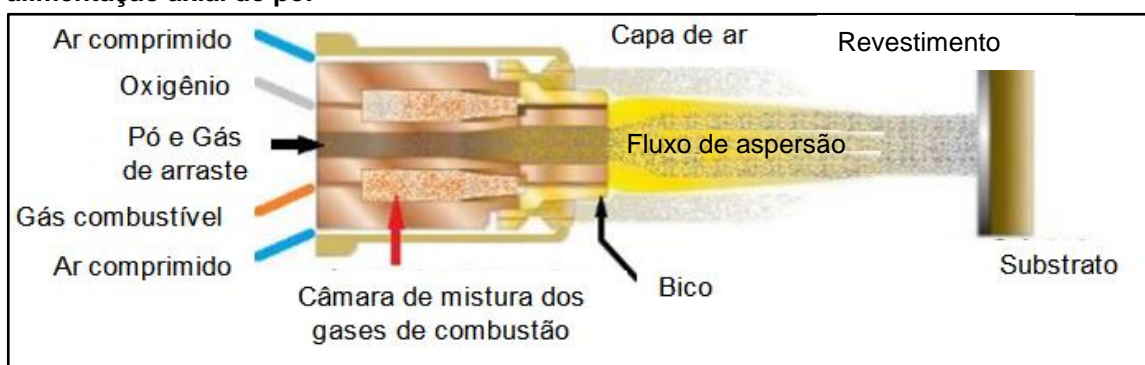
A Aspersão a chama convencional foi o primeiro processo de Aspersão Térmica a ser desenvolvido (aproximadamente em 1910) e continua em uso até os dias de hoje, devido ao seu baixo custo e a facilidade de manuseio (PAWLOWSKI, 2008).

Este processo utiliza o calor gerado pela combustão de uma mistura de gases (oxigênio-acetileno ou oxigênio-propano) para fornecer a energia térmica para

o material que será depositado. Padilha (2011) descreveu que a mistura dos gases ($C_2H_2 + O_2$) no bico da pistola produz uma combustão capaz de fundir o material a ser depositado, posteriormente, um jato composto por gases da combustão e o gás de transporte atomiza o metal fundido projetando-o com alta velocidade contra o substrato. A variação na porcentagem da mistura de gases utilizados interfere no aporte térmico fornecido à partícula a ser aspergida.

Quando é utilizado material de aporte na forma de pó, este é levado até a pistola por um gás de arraste (Nitrogênio ou Argônio), onde as partículas têm velocidade controlada pelo gás de arraste e no momento do encontro com a chama, fundem num instante e o jato de gás de transporte projeta-as contra o substrato (SUCHARSKI, 2016). O material aquecido impelido contra o substrato pelo jato de Nitrogênio ou Argônio promove a deformação e a aderência das partículas, resultando numa fina camada de revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007; PADILHA, 2011; SUCHARSKI, 2016). O processo Chama a Pó é caracterizado por atingir velocidade de impacto de partículas na faixa de 30 a 180 m/s, temperatura das partículas entre 2000 e 2800 °C, tensão de aderência média entre 20 e 38 MPa, porosidade na faixa de 15 e 20% e 4 a 15% de óxidos (IRVING; KNIGHT; SMITH, 1993). A Figura 7 apresenta um desenho esquemático da pistola de chama com alimentação axial de pó.

Figura 7 - Desenho esquemático do processo de Aspersão Térmica Chama com alimentação axial de pó.



Fonte: Sucharski (2016).

Sucharski (2016) comentou que nesta configuração de pistola de Aspersão Térmica, o combustível e o oxigênio passam por uma câmara de mistura de gases antes de iniciar a combustão a frente do bico. O ganho de energia cinética

pelas partículas em voo é dado pelo gás de transporte unido a propagação dos gases de combustão, formando o fluxo de aspersão. O ar comprimido é utilizado para resfriar o bico da pistola e formar uma capa de ar que envolve o fluxo de aspersão, concentrando a chama e diminuindo o espalhamento das partículas aspergidas. O material aquecido, impelido contra o substrato, sofre deformação pelo impacto, se conformando sobre a superfície, formando pontos de ancoramento mecânico para, dessa forma, garantir a aderência, resultando em uma camada de revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007; KREYE, 1998; SMITH; FAST, 1994).

O processo Chama a Pó é de baixa energia cinética, como consequência disso, faz com que uma grande energia térmica seja transferida para as partículas, sendo assim, as partículas ficam mais tempo expostas a fonte de calor, o que permite que as partículas tenham maior molhabilidade ao se chocarem contra o substrato, formando panquecas alongadas, apresentando uma estrutura com filmes de óxidos interlamelares, bem como porosidade (SUCHARSKI, 2016).

O efeito de molhabilidade que ocorre entre as partículas aspergidas, o substrato e camadas já depositadas, não depende somente da energia térmica e cinética contida nas partículas, como também da temperatura do substrato, ou seja, se foi utilizado pré-aquecimento ou não. O pré-aquecimento do substrato possibilita aumentar o mecanismo de molhamento, pela diminuição da taxa de transferência de calor para o substrato, sendo assim, o aumento do tempo de resfriamento da partícula permite que seja mais eficiente o efeito do molhamento, o que possibilita obter revestimentos com maior aderência e menor porosidade (SUCHARSKI, 2016).

As principais variáveis que devem ser reguladas no processo são: pressão e fluxo de ar comprimido, utilizado para transferir às partículas da fonte de calor até o substrato e fornecer a pressão suficiente para alimentar o pó no bico da pistola e, o fluxo de acetileno e oxigênio para formar e manter a chama (neutra) que permite a fusão do material (LIMA; TREVISAN, 2007).

A combustão no bico da pistola pode alcançar níveis de temperaturas em torno de 3000°C (MARQUES, 2003), enquanto que na peça durante o processo de aspersão a temperatura não ultrapassa 200°C (PAREDES, 1998).

Após serem depositados, os revestimentos podem ser aquecidos com auxílio de maçaricos ou fornos para fundir ou difundir a camada depositada, a fim de atingir aderência e densidade pretendida (PADILHA, 2011; PAREDES, 1998).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia fundamenta-se na viabilidade da deposição por Aspersão Térmica Chama a Pó da liga FeMnCrSiB que apresentou granulometria na faixa de - 180 μm +63 μm para o revestimento do aço carbono SAE 1020 que foram cortados nas dimensões 25 x 76 x 6 mm (LxCxE).

3.1 Materiais

3.1.1 Pós para deposição

O material de deposição escolhido para os revestimentos deste estudo é a liga de FeMnCrSiB de microestrutura austenítica. É derivada de uma liga desenvolvida por Pukasiewicz (2008), de composição química baseada nas ligas SMA (*Shape Memory Alloys* – Ligas com memória de forma), a princípio esta liga foi produzida na forma de arame, para ser depositada pelo processo por arco elétrico (ASP). A liga utilizada neste trabalho está na forma de pó, produzida por atomização em argônio (SUCHARSKI, 2016).

As granulometrias utilizadas (granulometria -180+63 μm) foram separadas por peneiramento, foi empregado para deposição partículas abaixo da peneira com abertura de malha de 180 μm e acima da peneira com abertura de malha de 63 μm .

A composição química da liga está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química nominal da liga (% em peso).

Fe-Mn-Cr-Si-B	Fe	C	N	Mn	Cr	Si	B
Liga A	Res	0,1 – 0,2	0,25 – 0,35	14 – 16	14 - 16	3 – 3,5	0,2
Liga B	Res	0,1 – 0,2	0,25 – 0,35	14 – 16	14 - 16	3 – 3,5	0,5

Fonte: Adaptado de Sucharski (2016).

A composição das ligas depositadas deu-se a partir dos elementos descritos na Tabela 4, no entanto, para finalidade de estudos e análises foi variado o teor de Boro, sendo assim as ligas foram definidas em função das comparações do elemento boro, cujo teor variou de uma composição para outra.

3.1.2 Substratos

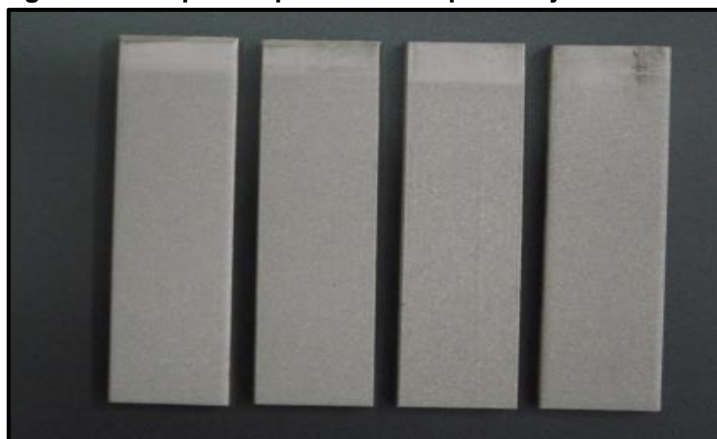
Foram utilizadas chapas de aço SAE 1020, cuja composição está descrita na Tabela 5. Os substratos sofreram o processo recomendado para obtenção da rugosidade superficial necessários à aderência do revestimento e limpeza através do jateamento abrasivo que garantiu a limpeza grau Sa3 (Figura 8), segundo a norma NACE RMN – 01/70 (National Association of Corrosion Engineers).

Tabela 5 - Composição química do aço SAE 1020.

Elementos	C	Mn	Si	P	S
Teor em %	0,18 – 0,23	0,40 – 0,60	0,30 – 0,60	0,035 máx	0,035 máx

Fonte: Spectru (2017).

Figura 8 - Corpos de prova com superfície jateada.



Fonte: Autorial Própria.

3.2 Métodos

3.2.1 Jateamento Abrasivo

Antes de efetuar a deposição é necessária a limpeza cuja finalidade é obter rugosidade desejável nos corpos de prova. Para isso foi usada a cabine de jateamento CVM modelo 65 9075, mostrada na Figura 9. O ar comprimido promove o impacto de um fluxo de material abrasivo sob alta pressão, na superfície do substrato.

Utilizou-se abrasivo de óxido de alumínio branco. A Tabela 6 mostra os parâmetros utilizados para jateamento.

Figura 9 - Cabine de jateamento.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 - Parâmetros empregados no jateamento abrasivo das amostras.

Parâmetros	Valores utilizados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco #30 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Gás de transporte do abrasivo	Ar comprimido
Pressão de Jateamento	80 à 100 psi
Distância de jateamento	100 mm
Ângulo	90°

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Rugosidade

A medição da rugosidade, a qual foi induzida pelo jateamento, foi realizada com o auxílio do Rugosímetro MITUTOYO SJ-201 (Figura 10). Esse equipamento é capaz de fornecer as medidas em Ra: desvio médio aritmético; Rz: altura das irregularidades em dez pontos; Ry: altura máxima das irregularidades; RSm: espaçamento médio das irregularidades nas medições horizontais. As medidas de rugosidade superficial foram feitas seguindo a norma de medição P-NB-13 da ABNT.

Figura 10 - Rugosímetro.



Fonte: Autorial Própria.

3.2.3 Deposição

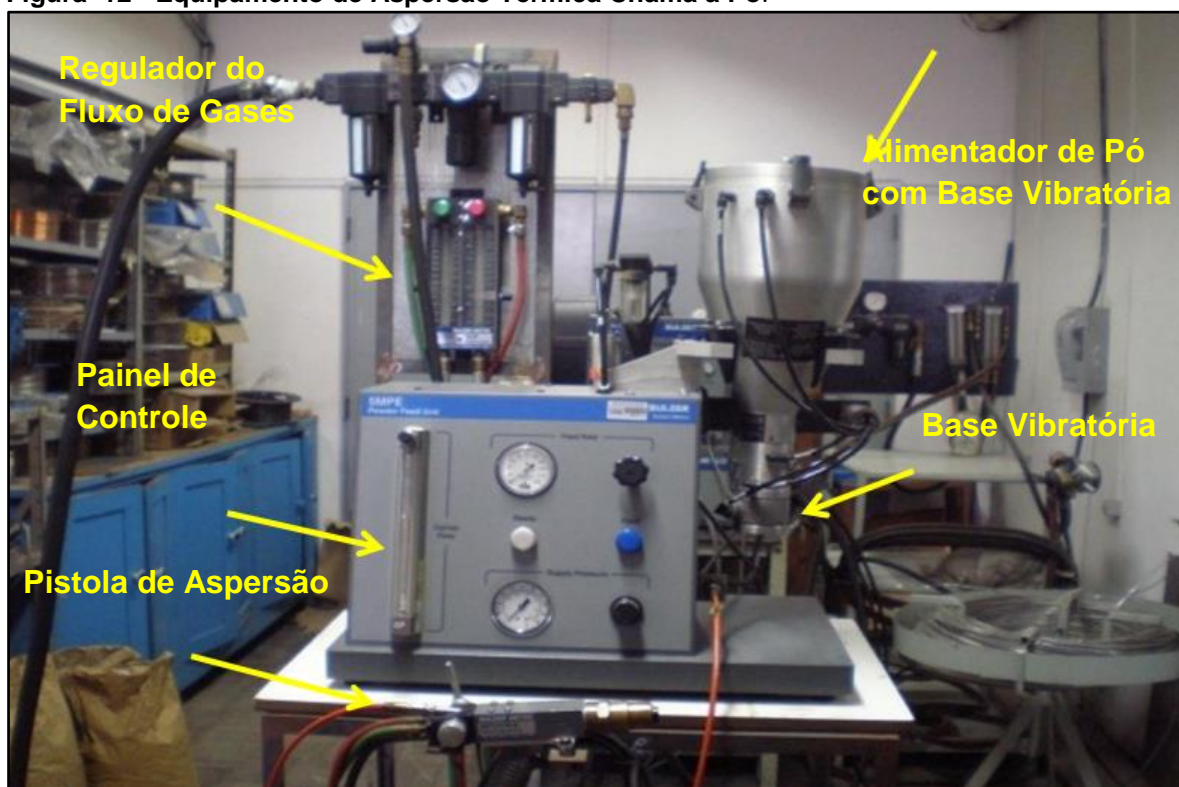
As deposições foram realizadas no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) da Universidade Federal do Paraná (Figura 11). Foi utilizada a cabine de aspersão com sistema de exaustão e retirada do pó via parede com lâmina de água; bancada de aspersão (Figura 12) fabricante Sulzer modelo 5 MPE com pistola 6PII e alimentador RP5, funil por onde passa o pó com alimentação constante. Os gases utilizados no processo de aspersão foram oxigênio, acetileno e argônio.

Figura 11 - Deposição pelo Processo Chama a Pó.



Fonte: Autorial Própria.

Figura 12 - Equipamento de Aspersão Térmica Chama a Pó.



Fonte: Autoria Própria.

Antes da deposição foram feitos testes preliminares para determinação dos valores adequados dos parâmetros de aspersão, variando os valores de fluxo dos gases e números de camadas, até a obtenção do revestimento esperado. Os valores ideais encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis adotadas no processo de revestimento.

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

Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento faz parte da preparação da superfície, pois aliado a determinadas condições de processamento (controle da velocidade de transferência do material aspergido, fluxo e velocidade de deslocamento da partícula) pode favorecer a formação de revestimentos com melhor aderência (PADILHA, 2011).

O pré-aquecimento tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal. Porém, submeter o substrato a altas temperaturas por tempos prolongados pode resultar na produção de espessas camadas de óxidos (LIMA; TREVISAN, 2007). O aquecimento pode ser realizado pela chama redutora da própria pistola de Aspersão Térmica, por um equipamento independente ou se o tamanho da peça for apropriado também pode ser por indução.

A determinação da temperatura de pré-aquecimento depende das tensões térmicas residuais no revestimento, da natureza dos materiais do revestimento, do substrato e de suas propriedades físicas. O pré-aquecimento favorece a redução de tensões internas que influenciam na aderência do revestimento (MARANHO, 1996). Quando as partículas aquecidas chocam-se com o substrato o seu resfriamento é acelerado, acompanhado da contração do material depositado. O substrato se dilata, por estar frio, ao absorver a energia térmica dada pelas partículas, além da energia transferida pela chama da pistola de aspersão. Sendo assim, sucedem tensões contrárias na interfase substrato/revestimento, que podem ser reduzidas e melhor distribuídas quando o substrato é pré-aquecido (LIMA; TREVISAN, 2007). As temperaturas recomendadas para o substrato estão na faixa de 90 a 150°C (PAREDES, 1998).

Nos corpos de prova o pré-aquecimento foi realizado com o auxílio de maçarico a gás sendo a temperatura controlada por um pirômetro até atingir a temperatura desejada de 150°C para posterior deposição do material.

3.2.5 Pós-aquecimento

Podem ser efetuados tratamentos posteriores à deposição dos revestimentos. Pukasiewicz (2008) refundiu os revestimentos metálicos aspergidos pelo processo ASP pelo processo de soldagem PTA e relatou que as mudanças de

comportamento das ligas antes e depois do processo de refusão por PTA são tamanhas conforme resultados dos ensaios de resistência ao desgaste por cavitação encontrados para as ligas de FeMnCrSiNi.

Capra (2005) depositou alumínio pelo processo FS e em seguida refundiu pelo processo a chama com uso de maçarico. Esses experimentos modificam as características dos revestimentos da condição de aspergidos para refundidos, com diluição do substrato, inclusive (VÁZ, 2013).

Olívio (2012) procedeu com tratamento térmico de revestimentos de ligas de Níquel-Alumínio depositadas por processo FS, resultando em redução de valores de porosidade em cerca de 30% para as ligas estudadas, em virtude do coalescimento entre as lamelas na temperatura de pós-aquecimento (750°C e 850°C), também ocorreu o crescimento da fração de óxidos, que preencheram parcialmente os vazios dos poros, oxidação essa devida ao descontrole da atmosfera do forno utilizado, houve também a elevação da dureza da camada em cerca de 40%.

Depois de depositado o material sobre o substrato, com o auxílio de maçarico a gás a peça foi submetida ao pós-aquecimento até atingir a temperatura de 250°C, essa temperatura foi mantida por 3 minutos.

3.3 Identificação das Amostras

Foram depositados 7 corpos de prova para cada liga, totalizando 14 corpos de prova de aço SAE 1020 na forma de chapas.

Para deposição dos revestimentos e posteriores análises e ensaios necessários, os corpos de prova foram identificados segundo o teor de boro da liga (Tabela 8).

Tabela 8 - Identificação das amostras.

Descrição	Identificação
Corpo de prova com 0,2% Boro	CP1
Corpo de prova com 0,5% Boro	CP2

Fonte: Autoria própria.

3.4 Caracterização

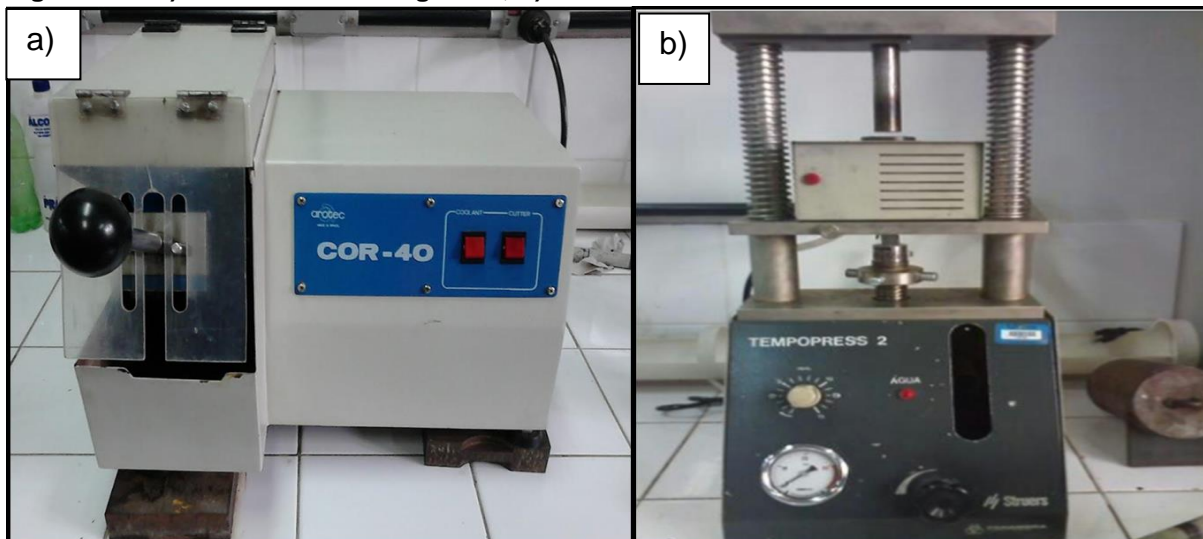
Depois de aspergido, cada corpo de prova foi cortado em 6 partes iguais na cortadora metalográfica, da marca AROTEC, modelo COR – 40, utilizando discos de corte lisos. Dessas 6 partes, uma parte foi embutida com baquelite preto na prensa embutidora automática, da marca Struets, modelo Tempopress 2. A parte embutida (Figura 13) foi lixada em politriz automática, com lixas com granulometria de 100 a 1200. Após o lixamento, o corpo de prova foi polido com pano de polimento e pasta de alumina de 1 μm . Ambos os equipamentos utilizados estão localizados no Laboratório de Materiais da UTFPR CP (Figura 14).

Figura 13 - Corpo de prova embutido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - a) Cortadora metalográfica; b) Prensa embutidora automática.



Fonte: Autoria própria.

3.5 Análises e Ensaios

3.5.1 Ensaio de Microdureza Vickers

A dureza Vickers baseia-se na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga. Foram realizadas medidas do material de base até o revestimento. Também foram obtidas 10 endentações de microdureza de cada revestimento e assim realizada a média aritmética de durezas e o desvio padrão destas. A carga aplicada foi de 300 gf por 15 segundos, o equipamento utilizado foi da marca Panantec ATMI, que se encontra no Laboratório de Materiais da UTFPR-CP (Figura 15).

Figura 15 - Equipamento de Microdureza Vickers.



Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Microscopia Ótica

As imagens para análise microscópica foram obtidas pelo microscópio Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais (LAMATS) da UFPR (Figura 16). Utilizando esse equipamento foi possível capturar imagens de 20x a 1000x de ampliação e fazer medição da espessura do revestimento, para

dessa forma, analisar a microestrutura formada pelo material depositado sobre a superfície do substrato.

Figura 16 - Microscópio Ótico.



Fonte: Autoria própria.

3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através do MEV, ocorreu um estudo da microestrutura, possibilitando a obtenção de imagens com alta resolução do revestimento e sua análise química através do EDS acoplado. Foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Zeiss. A análise da composição química, semi-quantitativa foi realizada por micro-análise de energia dispersiva (EDS) utilizando detector de energia dispersiva de raios X, acoplados ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), ambos os equipamentos instalados na Central de Laboratórios de Pesquisa da UNESP – Câmpus Bauru (Figura 17).

Figura 17 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS acoplado.



Fonte: A autoria própria.

3.5.4 Ensaio de desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha

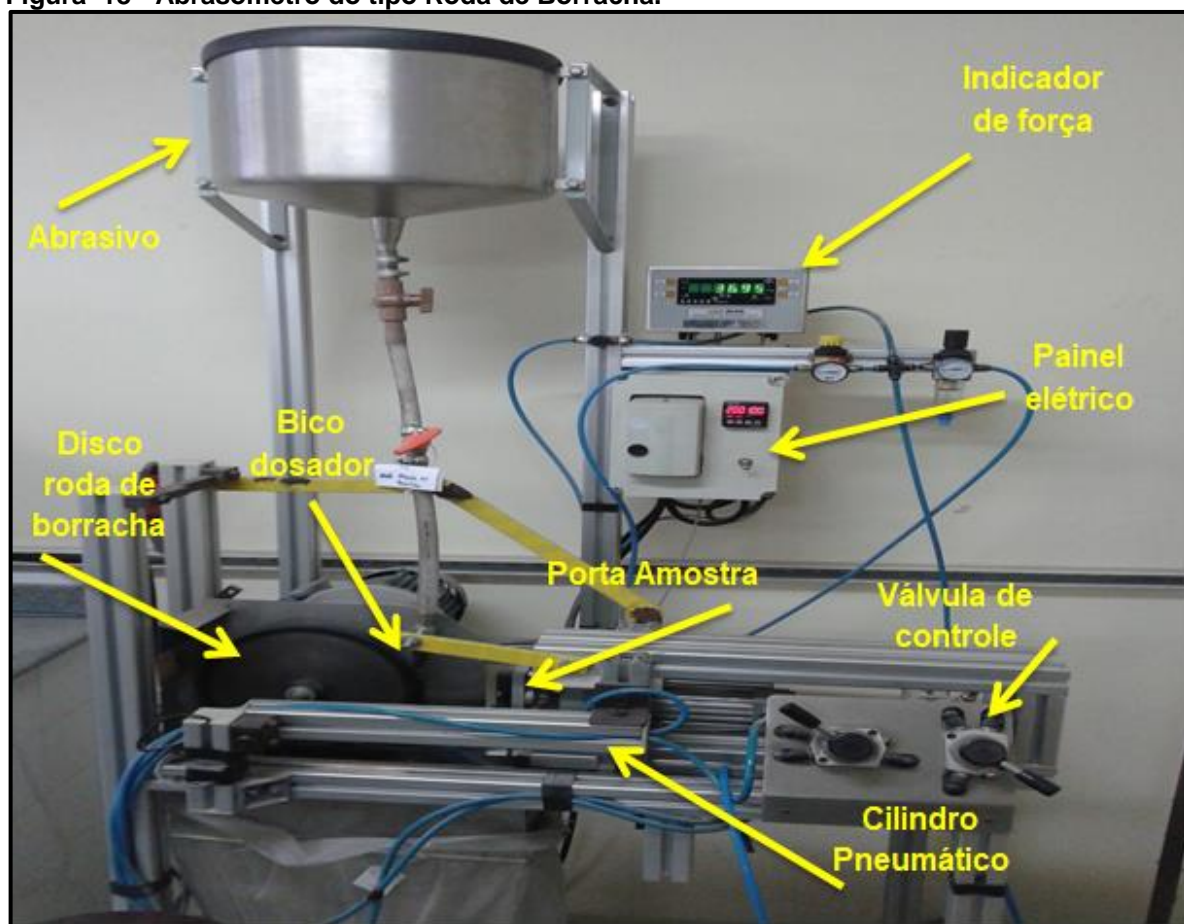
O ensaio normalizado pela norma Americana: *American Society for Testing and Materials*, ASTM (ASTM G-65. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*) é um teste de resistência à abrasão para materiais utilizados na indústria, o ensaio mede o desgaste devido a partículas duras forçadas contra e se movimentando sobre uma superfície sólida, similar a muitas situações presente no ambiente industrial. O ensaio gera dados que classificarão os materiais quanto à resistência à abrasão. Materiais com maior resistência abrasiva apresentam menor perda de massa (LIMA; TREVISAN, 2007).

Para verificação da resistência ao desgaste foi feito o ensaio de abrasão a três corpos, de acordo com a norma ASTM G-65, que possui cinco procedimentos distintos (A, B, C, D e E) que varia em relação ao tempo de aplicação e carga do ensaio (LIMA; TREVISAN, 2007).

Os ensaios de desgaste foram realizados por um Abrasômetro do tipo Roda de Borracha, que encontra-se no laboratório de Tribologia da UDESC – Câmpus Joinville (Figura 18), pelo procedimento do tipo B, o qual é utilizado para materiais com alta resistência à abrasão, como também é comum utilizá-los em materiais com média e baixa resistência, seguindo as orientações da ASTM G-65, dentre as quais se destacam: as dimensões das amostras de 25 x 76 x 6 mm; disco

de 12,7 x 228,6 mm; anel de borracha, com dureza de 60 Shore A; areia com classificação AFS 50/70; rotação de disco de 200 RPM; tempo de ensaio de aproximadamente 10 minutos; força nominal de 130 N. Para cada liga foram ensaiadas 4 amostras aspergidas, também foram analisados 4 corpos de prova do aço SAE 1020 sem revestimento. O desgaste foi obtido em função da perda de massa dos corpos de prova, pela comparação entre as massas antes e após os ensaios. Todas as amostras tiveram suas massas medidas numa balança digital (Figura 19) com precisão de 0,001 gramas no início de cada ensaio, e novamente pesadas ao final do ensaio. Antes da pesagem, as amostras foram limpas, imersas em álcool e em seguida secas com ar quente.

Figura 18 - Abrasômetro do tipo Roda de Borracha.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 - Pesagem das amostras.

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 9 ilustra os parâmetros de teste do ensaio de desgaste por Abrasomêtro do tipo Roda de Borracha, de acordo com a norma ASTM G-65.

Tabela 9 - Parâmetros de teste para ensaio de desgaste.

Parâmetros	Valores utilizados
Dimensões do disco com anel de borracha	12,7 x 228,6 mm
Rotação do disco	200 rpm
Tempo de ensaio	Aproximadamente 10 minutos
Fluxo de areia	350 g/min
Dimensões do corpo de prova	25 x 76 x 6 mm

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Medição da Rugosidade do substrato

A Tabela 10 mostra o resultado da média das 10 medidas feitas nos corpos de prova logo após o processo de jateamento abrasivo.

Amostras	Ra (μm)
CP1	8,35
CP2	8,58

Fonte: Autoria Própria.

As rugosidades obtidas são comparáveis com Terres (2006) que alcançou medidas de rugosidade Ra entre 4,99 e 8,59 μm , utilizando abrasivo de óxido de alumínio branco com #30 mesh em substratos de aço SAE 1020.

4.2 Microdureza Vickers

Foram realizadas 10 medidas de microdureza nas camadas de revestimento e 5 medidas no metal de base, como também foram calculadas as médias e os desvios padrões. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 - Microdureza na secção horizontal.

Pontos	CP1 (HV_{0,3})	CP2 (HV_{0,3})	Metal base (HV_{0,3})
1	287,4	551,9	202,8
2	358,8	454,1	161,2
3	400,9	499,4	166,6
4	290,5	456,1	160,5
5	423,4	420,5	177,0
6	317,9	224,9	
7	406,4	210,8	
8	518,7	644,5	

Tabela 11 - Microdureza na secção horizontal.

			(conclusão)
Pontos	CP1 (HV _{0,3})	CP2 (HV _{0,3})	Metal base (HV _{0,3})
9	470,0	441,7	
10	538,3	518,3	
Média	401,23	442,22	173,62
Desvio Padrão	84,73	127,90	15,73

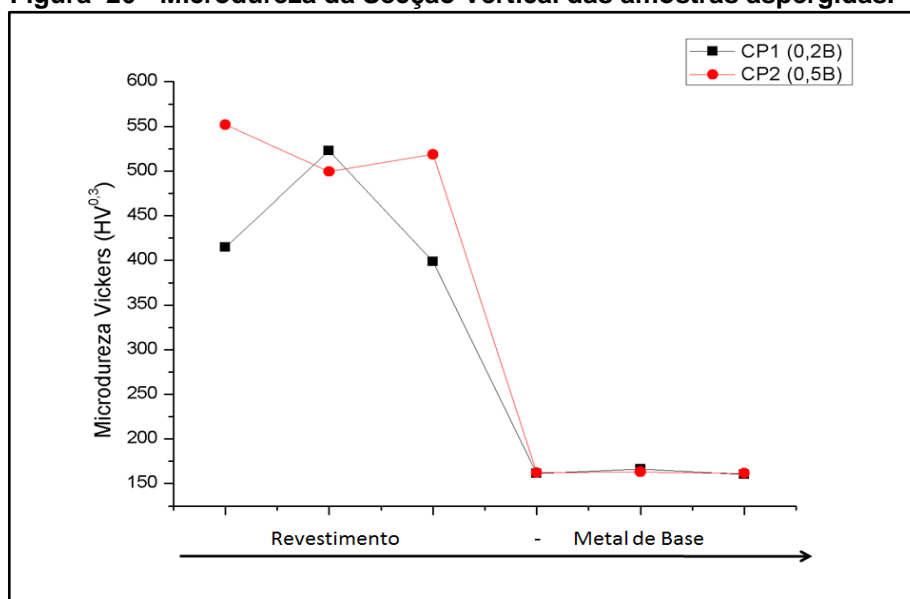
Fonte: Autoria própria.

O perfil de dureza das amostras mostrou um aumento significativo de dureza nos revestimentos com maior teor de boro. Pode-se notar que o revestimento CP2 teve maiores durezas, bem como uma média de microdureza superior ao revestimento CP1, ocorreu também o aparecimento de algumas medidas menos constantes, o que levou a um aumento do desvio padrão. O revestimento CP1 alcançou um padrão de medidas melhor, diminuindo assim o desvio padrão. Os valores de microdureza obtidos foram ótimos, pois mostram a formação de revestimentos com boa resistência mecânica.

O revestimento formado pela Aspersão Térmica Chama a Pó obtém várias fases presentes. Sendo assim, os valores altos de desvio padrão se devem ao fato das endentações não serem somente em uma fase formada e sim escolhidos pontos aleatórios para a aplicação da carga.

A Figura 20 mostra os valores de microdureza na secção vertical obtidos para as amostras aspergidas. Nota-se que para ambos os revestimentos as durezas tiveram o mesmo comportamento, aumentando da extremidade do metal de base ao revestimento.

Figura 20 - Microdureza da Secção Vertical das amostras aspergidas.

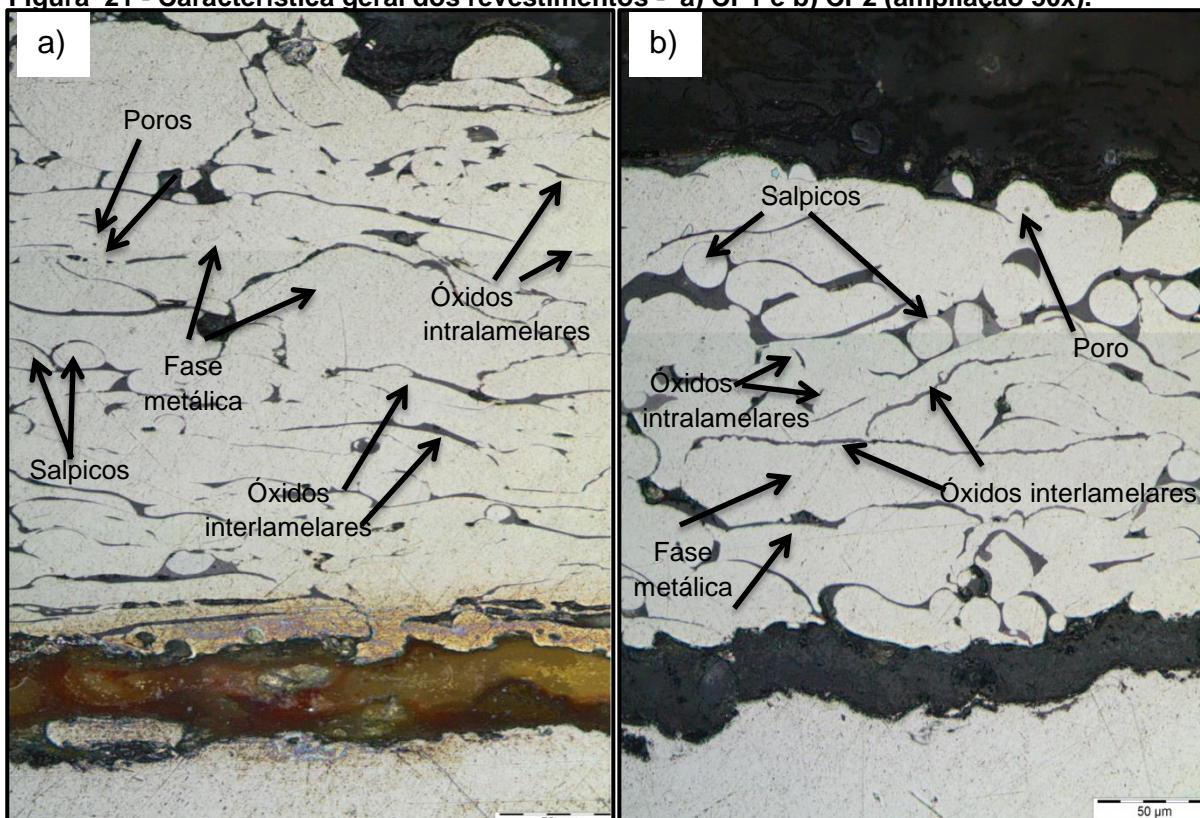


Fonte: Autoria Própria.

4.3 Microscopia Ótica

A Figura 21 apresenta a camada formada pela deposição das ligas, vistas pelo microscópio ótico.

Figura 21 - Característica geral dos revestimentos - a) CP1 e b) CP2 (ampliação 50x).

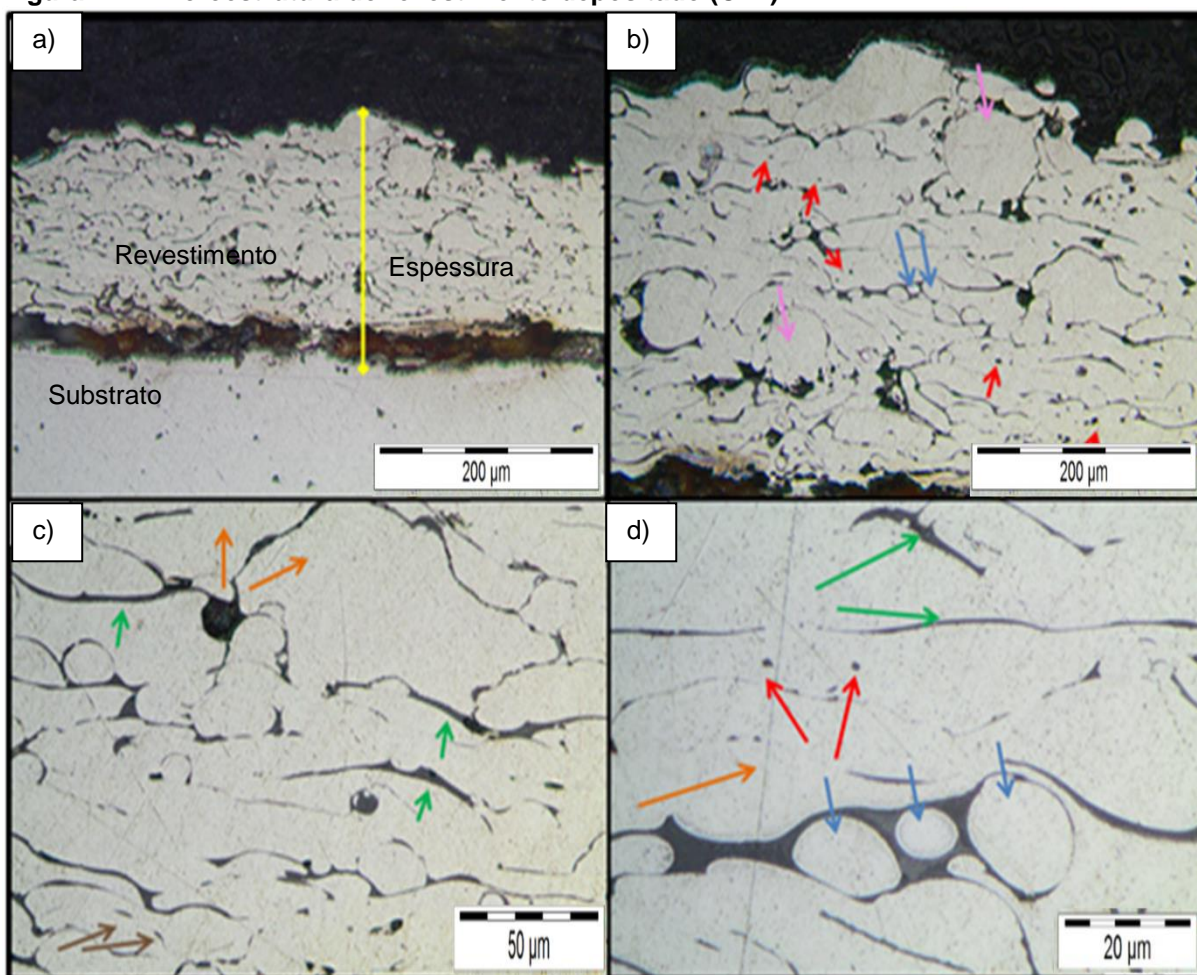


Fonte: Autoria Própria.

É possível observar na Figura 21 a presença da fase metálica (cinza claro), óxidos interlamelares e intralamelares (cinza mais escuro), poros e salpicos, como também o ancorramento das partículas ao substrato. A fase metálica obtida apresentou-se homogênea, ou seja, não houve presença de segregações nos revestimentos depositados (PUKASIEWICZ, 2008).

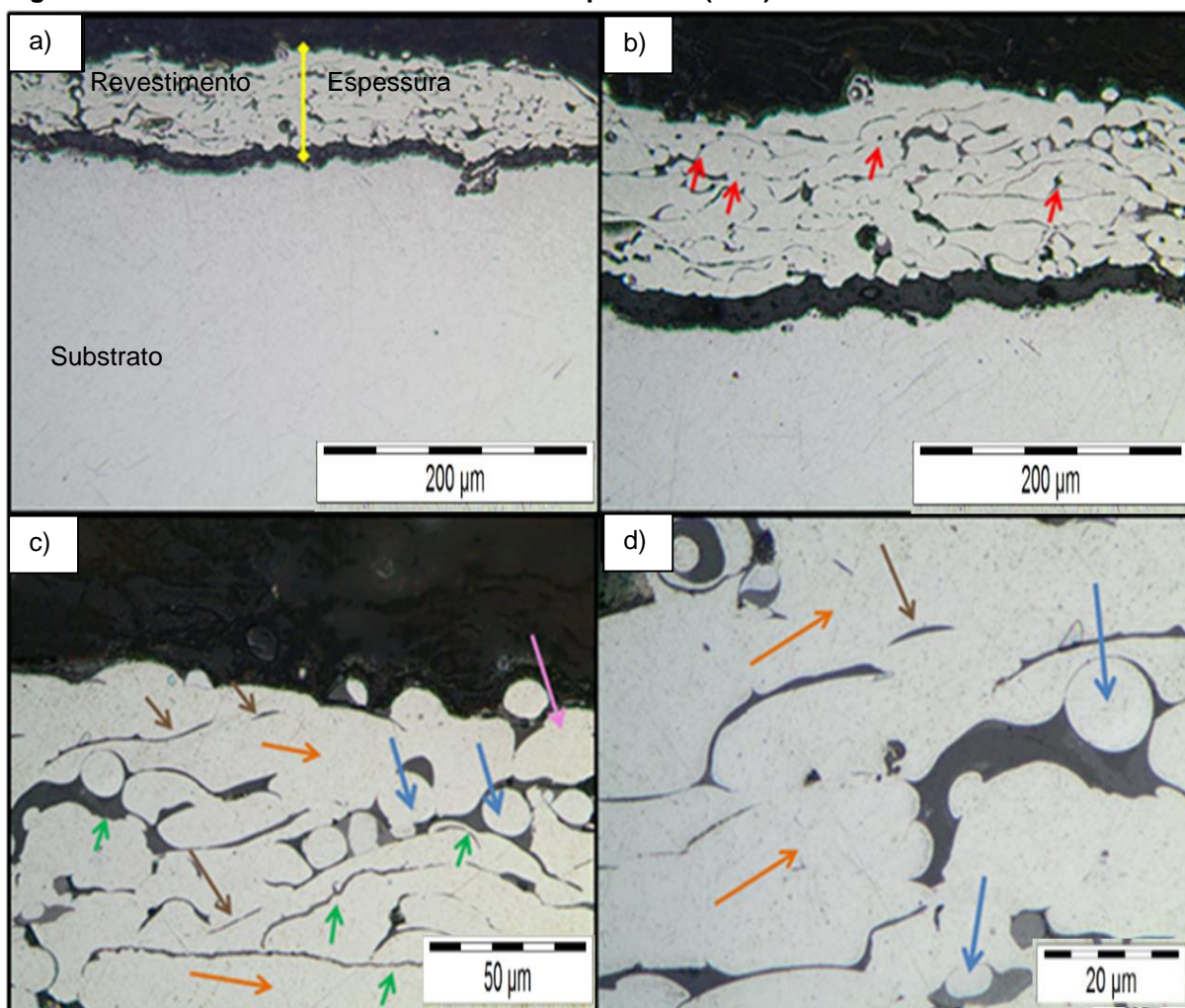
As Figuras 22 e 23 mostram a morfologia dos revestimentos obtidos. Em (a) espessura do revestimento, que ficou entre 250 e 500 μm , (b) microestrutura geral do revestimento (ampliação 20x), em (c) detalhe da microestrutura (ampliação 50x) e (d) superfície do revestimento (ampliação 100x). São comentados os principais microconstituintes da estrutura os quais são indicados por setas:

Figura 22 - Microestrutura do revestimento depositado (CP1).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 - Microestrutura do revestimento depositado (CP2).



Fonte: Autoria Própria.

- Panquecas: São as partículas aspergidas, que apresentam geometria alongada paralela à superfície do substrato, formadas pelo impacto de partículas fundidas ou com alto nível de plasticidade (setas laranjas);
- Porosidade: composta principalmente por poros, localizados entre as panquecas e filmes de óxidos (setas vermelhas). Padilha (2011) descreve que esta porosidade consiste tanto em cavidades isoladas, como em cavidades interconectadas que são capazes de permitir que líquidos e até gases penetrem até o substrato, o que representa um problema preocupante, pois a penetração de espécies agressivas irá acelerar o processo de degradação do revestimento;
- Salpicos: são desprendimentos de massa metálica da partícula ocorrida durante a sua colisão contra o substrato (setas azuis);

- Gotas pré-solidificadas: são partículas com baixa molhabilidade, originadas pelo processo de desfragmentação das gotas no momento do impacto (setas rosas);

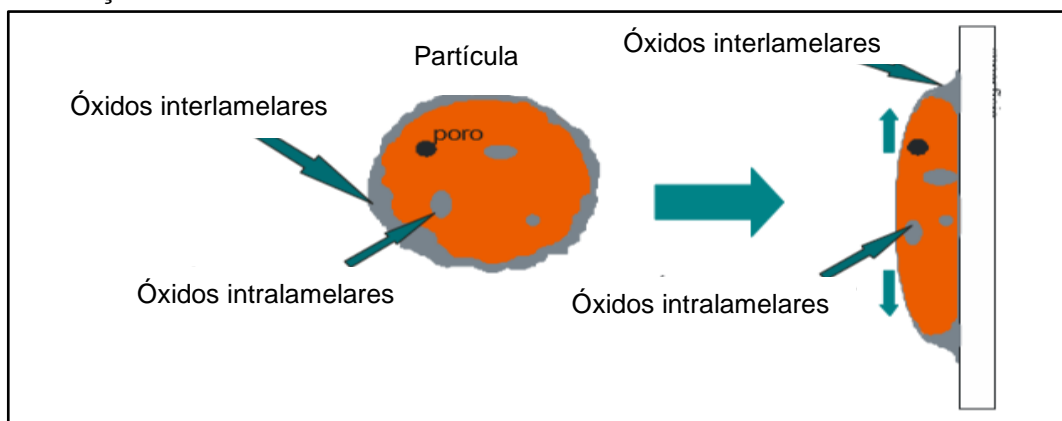
Na literatura não há uma distinção entre as gotas denominadas neste trabalho como pré-solidificadas e salpicos (ABEDINI et al., 2006; HOILE et al., 2004; NEWBERRY; GRANT, 2000; SOBOLEV; GUILMANY, 1999). Entretanto designou-se neste trabalho as gotas pré-solidificadas como sendo as gotas que apresentam um diâmetro de aproximadamente 40 μm , enquanto que os salpicos como sendo as gotas que apresentam um diâmetro médio entre 2 e 5 μm . Esta diferença sugere que apesar das gotas pré-solidificadas e dos salpicos serem formados pela instabilidade da partícula no momento do impacto, os seus mecanismos de formação devem ser diferentes (PUKASIEWICZ, 2008).

- Filmes de óxidos interlamelares: encontrados nos contornos das panquecas (setas verdes);

- Filmes de óxidos intralamelares: encontrados no interior das panquecas (setas marrons);

Segundo descrito por Deshpande; Sampath; Zhang (2006) e Pukasiewicz (2008), o filme de óxido (Figura 24) formado ao redor da partícula é segregado na frente da partícula devido à diferença de viscosidade existente entre o metal e o óxido. Onde a menor viscosidade do metal promove a segregação deste na região posterior da partícula projetando o óxido contra a superfície, ocasionando um espessamento do filme de óxido na região inferior da lamela.

Figura 24 - Desenho esquemático do processo de deformação das partículas e localização dos óxidos.



Fonte: Pukasiewicz (2008).

O surgimento de óxidos incrustados no revestimento aspergido é proveniente da reação do material aquecido ou líquido com o oxigênio (O) da atmosfera, durante a fusão na pistola, o trajeto entre a pistola e o substrato ou durante o processo de solidificação das lamelas sobre o substrato, como apresentam Fauchais, Vardelle e Dussoubs (2001), Newbery e Grant (2006) e Váz (2013).

As inclusões de óxidos aumentam a dureza do revestimento e isto pode gerar revestimentos frágeis, pois óxidos fraturam facilmente. Caso o teor de óxidos seja elevado, pode haver uma dificuldade de coesão entre as camadas depositadas, provocando uma diminuição da força coesiva do revestimento. Por outro lado, em algumas aplicações, inclusões de óxidos são desejadas, pois podem aumentar a resistência ao desgaste, à corrosão e a diminuição da condutividade térmica (DESHPANDE; SAMPATH; ZHANG, 2006; KNIGHT; SMITH, 1998; PADILHA, 2011, RODRIGUEZ, 2003).

Pelas análises das Figuras 22 e 23 foi possível verificar revestimentos com poucos poros, salpicos, gotas pré-solidificadas e grande fração de óxidos interlamelares e intralamelares. O revestimento CP1 mostrou uma formação regular das panquecas; analisando o revestimento CP2 foi possível notar que as lamelas mostraram-se mais alongadas.

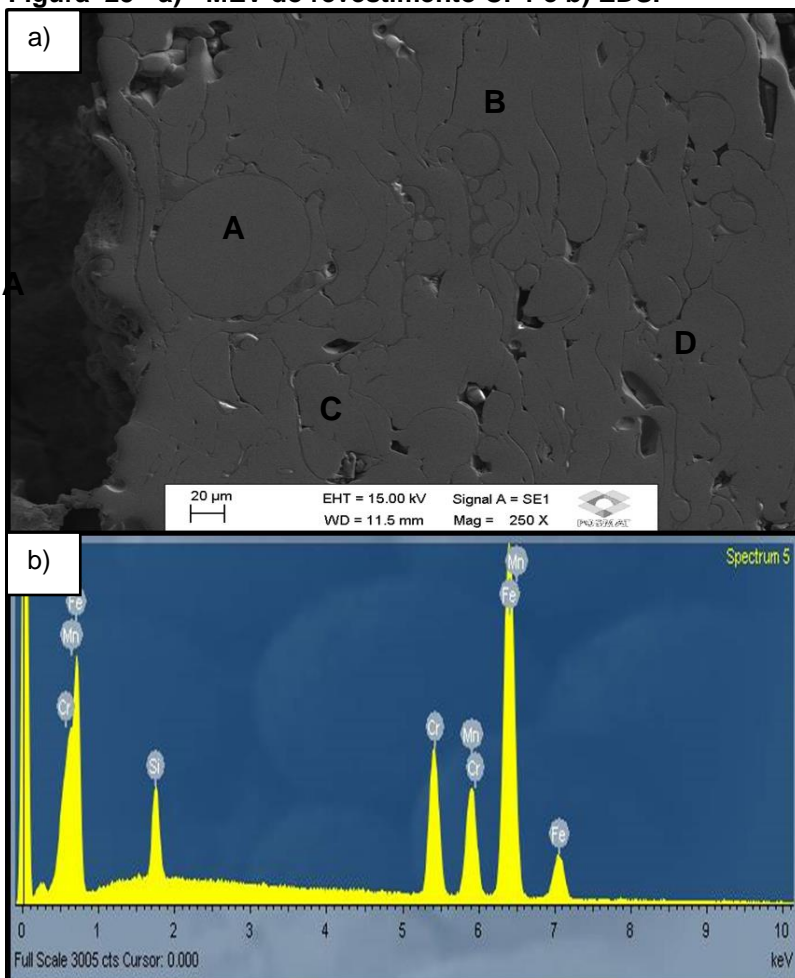
Alguns aspectos microestruturais são comuns nas ligas depositadas, como: fase metálica, presença de óxidos interlamelares e intralamelares, gotas pré-solidificadas e salpicos, lamelas deformadas pelo impacto e poros. Entretanto as lamelas do revestimento CP2 apresentam-se mais homogêneas, com uma melhor molhabilidade quando comparadas ao revestimento CP1, isso está relacionado ao aumento do teor de Boro (Tabela 4, p. 34) que influencia na microestrutura do revestimento.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras 25 e 26 mostram os resultados das análises da Microscopia Eletrônica de Varredura, com os respectivos espectros das análises EDS das regiões que identificam a microestrutura dos revestimentos. A análise EDS além de apresentar o espectro da região, também permite uma análise quantitativa do

revestimento, apresentando a composição química global dos revestimentos. As Tabelas 12 e 13 mostram a composição das fases presentes de cada região analisada.

Figura 25 - a) - MEV do revestimento CP1 e b) EDS.



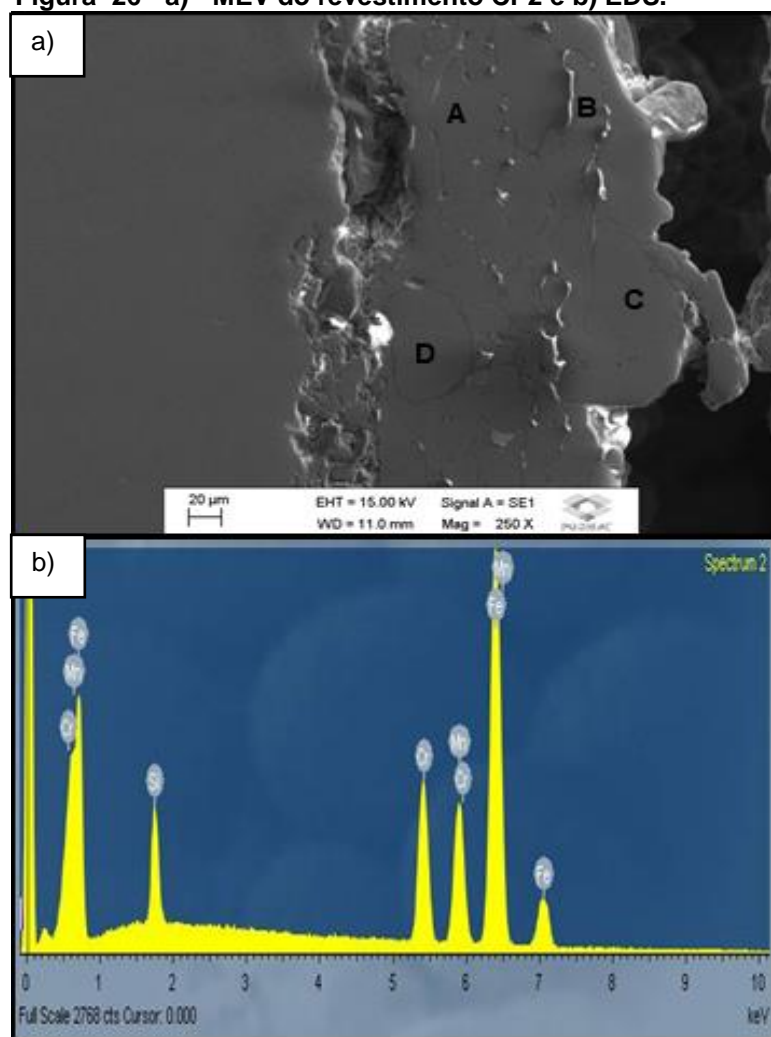
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12 - Composição das fases presentes (CP1).

Elementos	% A	% B	% C	% D
Fe	61,99	64,33	64,46	66,31
Mn	18,79	16,65	16,40	14,85
Cr	15,26	15,48	15,68	15,54
Si	3,97	3,54	3,46	3,32
Total	100	100	100	100

Fonte: Autoria Própria.

Figura 26 - a) - MEV do revestimento CP2 e b) EDS.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 13 - Composição das fases presentes (CP2).

Elementos	% A	% B	% C	% D
Fe	64,86	62,76	62,96	64,43
Mn	16,64	17,69	17,90	17,36
Cr	14,87	15,80	15,25	14,40
Si	3,63	3,75	3,89	3,81
Total	100	100	100	100

Fonte: Autoria Própria.

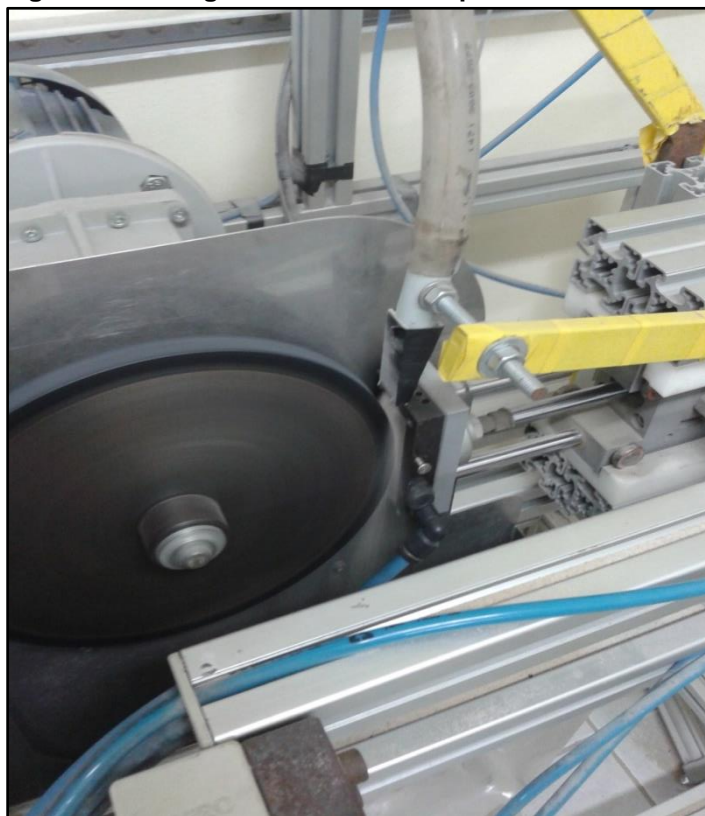
Observa-se similaridades na microestrutura e características dos revestimentos como também a composição química semelhante às encontradas nos resultados de Sucharski (2016).

Os resultados de EDS comprovam a composição química da liga, indicando valores muito próximos dos definidos pela composição química nominal da liga (Tabela 4, p. 33). Entretanto, esse não foi o objetivo principal de utilização desta técnica, pois há na composição química nominal da liga elementos de baixo peso atômico (boro (B), carbono (C) e nitrogênio (N)), sendo uma limitação desta técnica a detecção destes elementos.

4.5 Ensaio de desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha

O abrasômetro “roda de borracha” permite o desgaste abrasivo a três corpos, onde as partículas de areia são aprisionadas entre duas superfícies, que deslizam entre si (Figura 27). Os ensaios foram realizados pelo procedimento B. Após o desgaste as amostras foram novamente limpas, secas e pesadas para a determinação da massa perdida no ensaio.

Figura 27 - Desgaste das amostras pelo Abrasômetro Roda de Borracha.



Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 28, 29 e 30 mostram a superfície das regiões de desgaste das amostras. As Tabelas 14, 15 e 16 indicam os resultados da perda de massa das amostras ensaiadas.

Figura 28 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras CP1.



Fonte: Autoria Própria.

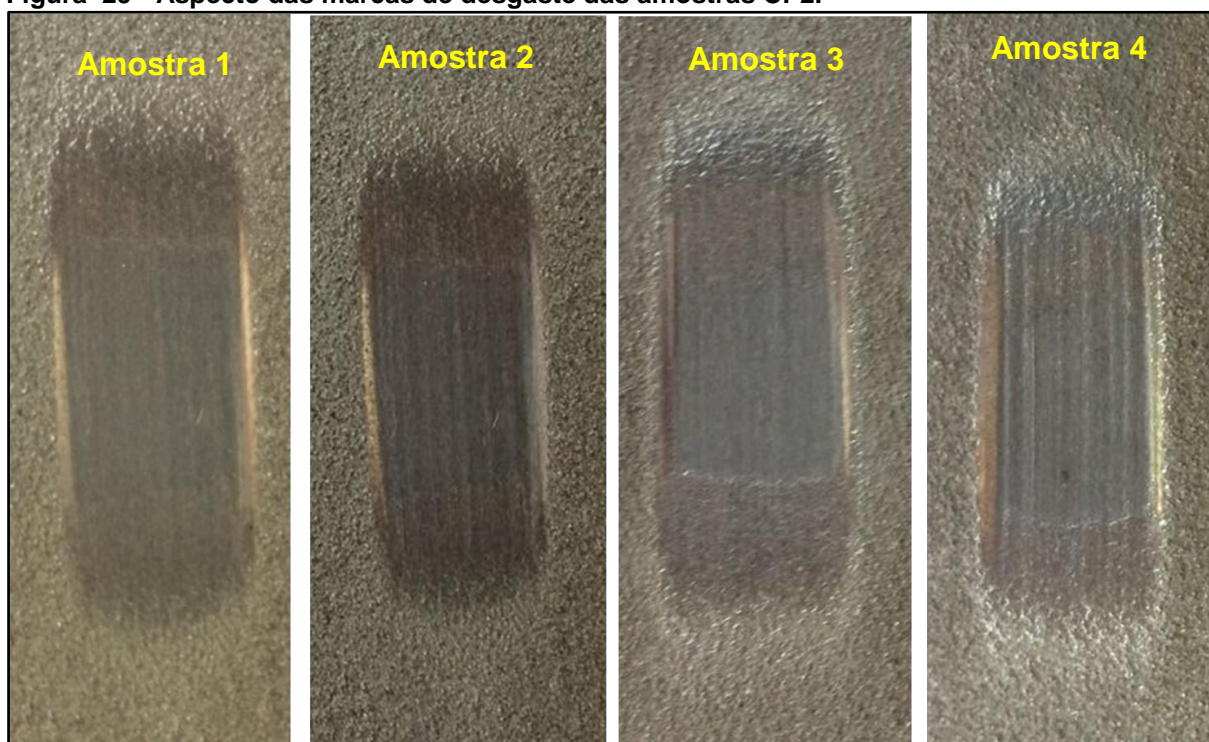
Tabela 14 - Resultados de perda de massa apresentada pelos corpos de prova CP1.

Amostra	Inicial (g)	Final (g)	Perda de Massa (g)
1	91,987	91,481	0,506
2	94,977	94,502	0,475
3	91,786	91,234	0,552
4	94,706	94,210	0,496

Fonte: Autoria Própria.

As amostras revestidas CP1 (Figura 28) apresentaram sulcos estreitos e menos profundos que resultou em uma pequena perda de massa (Tabela 14).

Figura 29 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras CP2.



Fonte: Autoria Própria.

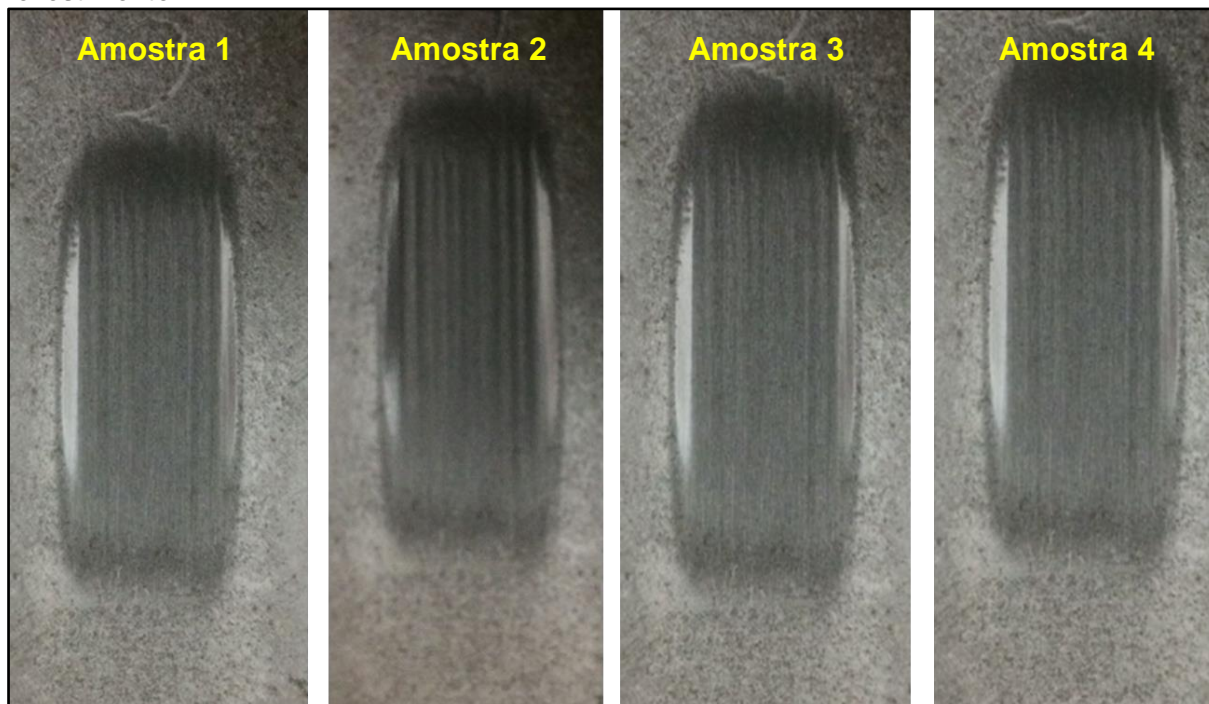
Tabela 15 - Resultados de perda de massa apresentada pelos corpos de prova CP2.

Amostra	Inicial (g)	Final (g)	Perda de Massa (g)
1	91,183	90,564	0,619
2	90,605	89,958	0,647
3	95,351	94,758	0,593
4	94,170	93,547	0,623

Fonte: Autoria Própria.

Foi observado que as amostras revestidas CP2 (Figura 29) exibiram sulcos mais profundos e largos, que como consequência proporcionou maior perda de massa (Tabela 15) em comparação com as amostras CP1 (Tabela 14).

Figura 30 - Aspecto das marcas de desgaste das amostras de Aço SAE 1020 sem revestimento.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 - Resultados de perda de massa apresentada pelo Aço SAE 1020 sem revestimento.

Amostra	Inicial (g)	Final (g)	Perda de Massa (g)
1	92,096	91,406	0,690
2	90,998	90,342	0,656
3	94,942	94,240	0,702
4	92,119	91,436	0,683

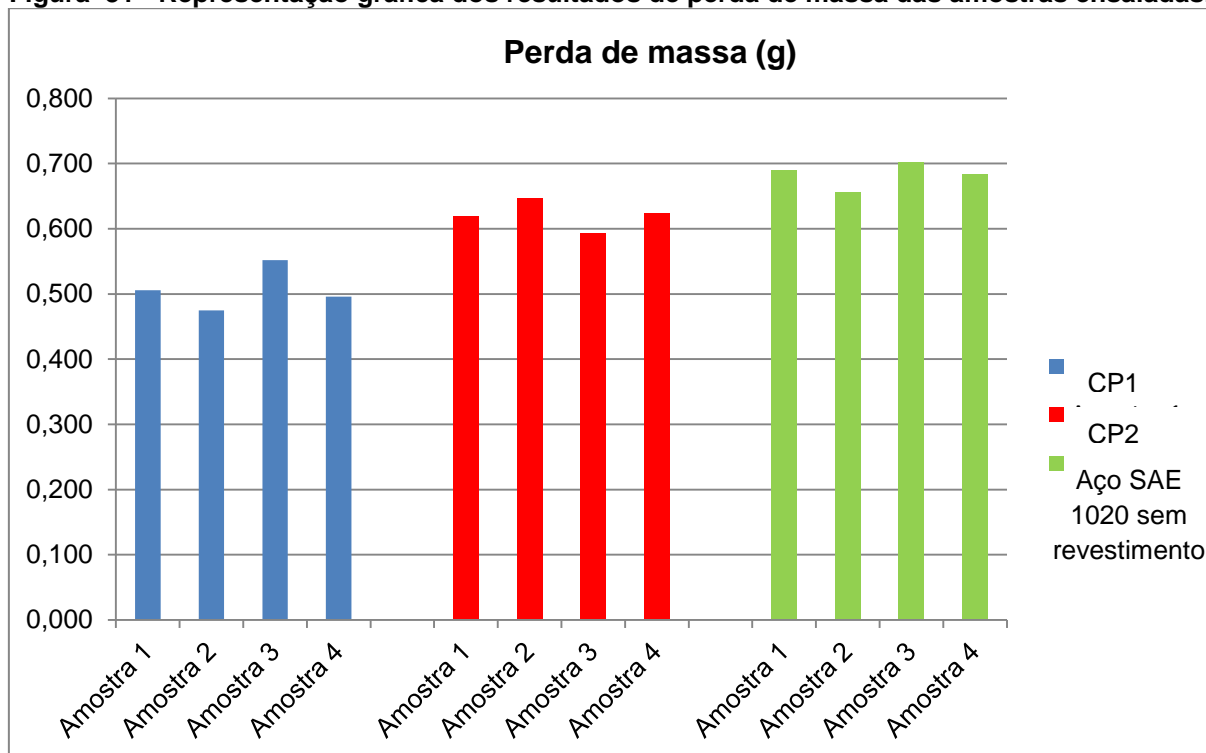
Fonte: Autoria Própria.

Analisando as amostras de Aço SAE 1020 sem revestimento (Figura 30), nota-se que as marcas de desgaste na superfície mostraram-se homogêneas, os sulcos provocados pela roda de borracha foram intensos resultando em valores maiores de perda de massa (Tabela 16).

Pela análise visual, as marcas de desgaste sobre os corpos de prova ensaiados exibem um desgaste uniforme, conforme solicitado pela ASTM G-65, o que mostra um bom alinhamento entre a face da amostra e a superfície da roda de borracha. A centralidade da marca de desgaste indica que a força foi aplicada de forma correta e alinhada com o eixo da roda.

A Figura 31 mostra graficamente os resultados da perda de massa das amostras ensaiadas apresentadas nas Tabelas 14,15 e 16.

Figura 31 - Representação gráfica dos resultados de perda de massa das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoria Própria.

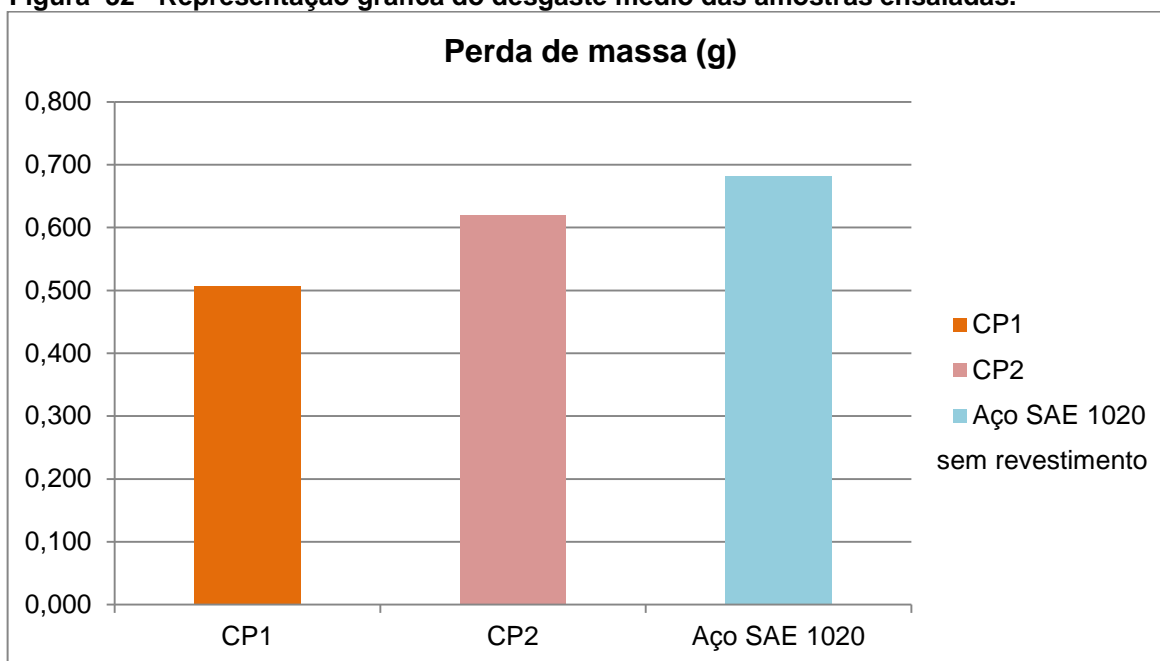
Analisando a representação gráfica (Figura 31) pode-se observar que o comportamento das amostras de cada situação foram semelhantes.

A perda de massa média das amostras ensaiadas e os desvios padrões são indicados na Tabela 17. A Figura 32 apresenta o desgaste médio sofrido pelos corpos de prova ensaiados.

Tabela 17 - Perda de massa média (em gramas) das amostras ensaiadas.

	Média	Desvio Padrão
CP1	0,507	0,028
CP2	0,620	0,019
Aço SAE 1020 sem revestimento	0,683	0,017

Fonte: Autoria Própria.

Figura 32 - Representação gráfica do desgaste médio das amostras ensaiadas.

Fonte: Autoria Própria.

Através dos resultados de perda de massa média mostrado na Tabela 17 e representado na Figura 32, pode-se notar que o Aço SAE 1020 quando ensaiado sem revestimento alcança uma perda de massa maior comparado aos corpos de provas com revestimento. As amostras CP2 tiveram uma média de perda de massa superior quando comparadas com as amostras CP1, isto está associado com o teor de boro da liga (Tabela 4, p. 33), pois a maior adição desse elemento resultou no aumento significativo da microdureza (Tabela 11, p. 46), que ocasionou fragilidade do revestimento. Sendo assim, a dureza do material, em alguns casos, não apresenta uma relação direta com a resistência à abrasão. Ribeiro (2004) comentou que dureza não é o melhor indicador da resistência ao desgaste, e ainda Scotti, Mello e Bálamo (1995) afirmam que um aumento de dureza nem sempre significa um aumento da resistência ao desgaste abrasivo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e comparando-os com a literatura, através dos ensaios de Microdureza Vickers e desgaste por Abrasômetro do tipo Roda de Borracha e das análises de Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura, pode-se concluir que:

- As propriedades dos revestimentos de FeMnCrSiB permitem mostrar à viabilidade da deposição através do processo de Aspersão Térmica Chama a Pó.
- A avaliação da microestrutura observada permite afirmar que as camadas do revestimento são coesas e homogêneas e que a presença de poros, gotas pré-solidificadas e salpicos é baixa.
- As variações do teor de Boro nas ligas atomizadas promoveram efeitos significativos nas características dos revestimentos.
- A liga B apresentou uma microestrutura mais uniforme, houve também um aumento na molhabilidade das partículas depositadas, isso está relacionado ao aumento do teor de Boro que influenciou na microestrutura.
- A liga B teve maiores valores de dureza, como também uma média de microdureza maior que a da Liga A. Portanto, a adição de Boro promove a formação de revestimentos com maior dureza.
- A liga A teve maior resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões, quando comparada com a liga B, sendo assim, percebe-se que o teor maior de Boro aumenta a fragilidade do revestimento, o que acarreta um desgaste maior da superfície revestida.
- O aço SAE 1020 sem revestimento resultou em um desgaste superior quando relacionado às amostras revestidas. Foi possível notar que a aplicação de revestimentos de FeMnCrSiB aumentou a resistência abrasiva dos substratos.
- Os valores de perda de massa alcançados através dos ensaios de abrasão a baixas tensões mostraram-se adequados, pelo fato de não exibirem desgaste diferenciado de um corpo de prova para outro, o que demonstra que os testes foram aplicados de forma correta.
- Os revestimentos de FeMnCrSiB apresentam grande potencial para aplicações onde o desgaste abrasivo têm sido a causa de grandes problemas e gastos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o processo de formação dos óxidos nos revestimentos aspergidos.
- Estudar a influência dos parâmetros de deposição, observando se as alterações nos parâmetros de processo são capazes de melhorar a morfologia dos revestimentos, diminuindo a taxa de desgaste.
- Utilizar outras técnicas de Aspersão Térmica para deposição das ligas, e comparar os resultados obtidos.
- Testar no campo ou/ e indústria, como por exemplo, em facas picadoras de cana.

REFERÊNCIAS

- ABEDINI, A.; POURMOUSA, A.; CHANDRA, S.; MOSTAGHIMI, J. Effect of substrate temperature on the properties of coatings deposited by wire arc spraying. **Surface & Coatings Technology**, v. 201, nº 6, p. 3350-3358, 2006.
- ALENCAR, Gladson T. M. **Efeitos da adição de carbonetos na resistência ao desgaste e à corrosão de uma liga auto-fluxuante depositada por aspersão térmica**. 2009.100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- ALMEIDA, Daniel S. de. **Estudo de Revestimentos Cerâmicos sobre Substrato Metálico, obtidos por Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons para Aplicação como Barreira Térmica**. 2005. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- 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.
- AWS, American Welding Society. **Thermal Spray: practice, theory, and application**. Estados Unidos, Florida, 1985.
- BAPTISTA, André L. B.; NASCIMENTO, Ivaldo A. **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas**. Spectru Instrumental Científico, 2009.
- CAPRA, Anderson. R. **Desenvolvimento de intermetálicos FeAl através de aspersão térmica e tratamento posterior**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- COLOMBO, B.M.; LAROSA, M.A.; PINTO, M.A. Influência dos meios de resfriamento na estrutura e resistência ao desgaste de um aço baixa-liga fundido. In: **64º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. Belo Horizonte, 2009.
- DAVIES, V. H.; BOLTON, L. A. The mechanism of wear. **Weld Surfacing and Hardfacing**. The Welding Institute, Cambridge, p. 4-10, 1980.
- DESHPANDE, S.; SAMPATH, 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, nº 18-19, p. 5395 – 5406, 2006.
- EYRE, T. S. The mechanisms of wear. **Tribology International**, v.11, p.91-96, 1978.
- FAUCHAIS, P.; VARDELLE, A.; DUSSOUBS, B. Quo Vadis Thermal Spraying. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 10, p. 44-66, 2001.
- GATES, J.D. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. **Wear**, v. 215, 1998.

GÓMEZ, A.G.; FRANCO, E.E.; SINÁTORA, A. Projeto e construção de um abrasômetro para realização de ensaios de desgaste abrasivo a quente. In: **64º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, Belo Horizonte, 2009.

GREGOLIN, José. A. R. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) Resistentes ao Desgaste**. 1990. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

HOILE, S.; RAYMENT, T.; GRANT, P. S.; ROCHE, A.D. Oxide formation in the Sprayform Tool Process. **Materials Science and Engineering: A**, v. 383, nº 1, p. 50–57, 2004.

IRVING, Bob.; KNIGHT Richard.; SMITH Ronald W. The HVOF process: the hottest topic in the thermal spray industry. **Welding Journal**, p.25-30, jul. 1993.

KNIGHT, R.; SMITH, R. W. **Thermal spray forming of materials, Powder Metal Technologies and Applications**. ASM Handbook, ASM International, vol. 7, p 408–419, 1998.

KREYE, H. Properties and characterization of thermal spray coating. In: **Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference**, France, p.629-634, 1998.

LEITE, Ricardo V.M.; MARQUES, Paulo V. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. **Soldagem Inspeção**, São Paulo, vol. 14, n. 4, p.329-335, Out/Dez 2009.

LIMA, C. R. P. **Caracterização de coberturas obtidas por aspersão térmica a plasma**. 2001. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

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

LUZIN, V.; VALAREZO, A.; SAMPATH, S. Through-thickness Residual Stress Measurement in Metal and Ceramic Spray Coatings by Neutron Diffraction. **Materials Science Forum**, v.571-572, p.315-320, 2008.

MARANHO, Ossimar. **Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARANHO, Ossimar. **Influência da preparação da superfície na aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. 1996. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

MARQUES, Paulo V. **Aspersão Térmica**. Infosolda, 2003.

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

MULHEARN, T.O.; SAMUELS, L.E. The Abrasion of Metals: A Model of the Process. **Wear**, vol. 5, ed. 6, p. 478-498, 1962.

NEWBERY, A. P.; GRANT, P. S. Oxidation During Electric Arc Spray Forming of Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 178, p. 259-269, 2006.

NEWBERY, A.P.; GRANT, P.S. Droplet splashing during arc spraying of steel and the effect on deposit microstructure. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 9, nº 2, p. 250-259, 2000.

NIKKEL, Walter. **Resistência ao desgaste por abrasão com impacto de revestimentos duros de Fe-Wc, em substratos de aço austemperado, depositado por aspersão térmica arco elétrico, com e sem tratamento térmico.** 2016. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia em Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. **N-2568**: Seleção e aplicação (por aspersão térmica) do alumínio, zinco e suas Ligas como revestimento anticorrosivo. Rio de Janeiro: Petrobras, 1996.

OLIVIO, Emillyn F. T. **Avaliação de Ligas de Ni-Al Utilizadas como Revestimento Estáveis a Altas Temperaturas Depositadas por Aspersão Térmica à Chama Pó.** 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PADILHA, Hélio. **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.** 2011. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PAREDES, Ramon S. C. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha.** 1998. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

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

PAWLOWSKI, Lech. **The science and engineering of thermal spray coatings.** England, John Wiley & Sons, 2008.

PRADEEP, G. R. C.; RAMESH, A.; PRASAD, B.D. A Review Paper on Hardfacing Processes and Materials. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.2, n.11, p.6507-6510, 2010.

PUKASIEWICZ, Anderson G.M. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP**. 2008. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

RODRIGUEZ, Regina M. H P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por Aspersão Térmica**. 2003. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

SCHIEFLER FILHO, Marcos F. O. **Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica**. 2004. 313 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SCHIEFLER, M.F.O.; VOYER, J.; GARTNER, F.; QI, X. Corrosion Behaviour of High Velocity Combustion Wire Sprayed Coatings. **International Thermal Spray Conference**. Essen. Germany, p. 553-558, 2002.

SCOTTI, A.; MELLO, J.D.B; BÁLSAMO, P. S. de S. Influência da Microestrutura sobre a Resistência ao Desgaste de Eletrodos da Classe Fé-C-Cr. In: **XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**, ABS, 1995.

SILVA, Christian E. da.; OTUBO, Jorge. Caracterização do mecanismo de desgaste abrasivo presente em Ligas Inoxidáveis Fe-Mn-Si-Cr-Ni com efeito de memória de forma – Parte 1: Influência da Temperatura de Austenitização. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, Paraíba, ago. 2010.

SILVA, Christian E. da.; OTUBO, Jorge. Caracterização do mecanismo de desgaste abrasivo presente em ligas inoxidáveis Fe-Mn-Si-Cr-Ni com efeito de memória de forma – parte 2: Influência da composição química e evolução da taxa de desgaste. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, Paraíba, ago. 2010.

SMITH, R. W.; FAST, R. D. The future of thermal spray technology. **Welding Journal**, p.43-50, 1994.

SOBOLEV, V.V.; GUILMANY, J.M. Effect of oxidation on droplet flattening and splat-substrate interaction in thermal spraying. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 8, nº4, p. 523-530, 1999.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA. **Catálogo de composição química dos aços**. Disponível em: http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/aco_carbono.pdf. Acesso em: 10 mai. 2017.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier, 2005.

SUCHARSKI, Gustavo B. **Deposição de Revestimentos Tipo Barreira Térmica por Aspersão Térmica**. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SUCHARSKI, Gustavo 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**. 2016. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SULZER. An Introduction to Thermal Spray. **Sulzer Metco**, v. 4, n. 4, Suíça, 2012.

TAKIMI, Antonio S. **Obtenção de superligas de NiCrAlY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF)**. 2004. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TERRES, Cristhian J. F. **Avaliação de revestimentos de aços inoxidáveis depositados por aspersão térmica**. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, vol. 225–229, p. 205–214, 1999.

VALAREZO, A.; CHOI, W. B.; CHI, W.; GOULDSTONE, A.; SAMPATH, S. Process Control and Characterization of NiCr Coatings by HVOF-DJ2700 System: A Process Map Approach. **Journal of Thermal Spray Technology**, v.19, ed. 5, p.852–865, 2010.

VÁZ, Rodolpho F. **Estudo de partículas metálicas aspergidas pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

WAINER, Emilio.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. ed. 4, São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

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

ZUM GAHR, Karl H. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology series**, v. 10, p.570, Elsevier Science Ltd, 1987.