CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Análise da influência do acabamento superficial no desgaste erosivo simulando ataque de cinzas volantes e na resistência à corrosão de revestimentos de Fe-Cr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica

Uirá Rodrigues da Silveira Montani

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador(a): Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc.
Coorientador(a): Marília Garcia Diniz, D. Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2025

Análise da influência do acabamento superficial no desgaste erosivo simulando ataque de cinzas volantes e na resistência à corrosão de revestimentos de Fe-Cr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Uirá Rodrigues da Silveira Montani

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
HECTOR REYNALDO MENESES COSTA
Data: 28/02/2025 19:36:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Presidente, Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ) (orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
MARILIA GARCIA DINIZ
Data: 12/03/2025 12:39:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professora Dra. Marília Garcia Diniz (UERJ) (Coorientadora)

gov.br Documento assinado digitalmente
HUMBERTO NOGUEIRA FARNEZE
Data: 12/03/2025 09:40:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Humberto Nogueira Farneze (CEFET /RJ)

gov.br Documento assinado digitalmente
GERONIMO PEREZ
Data: 14/03/2025 06:36:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Geronimo Perez (UFF / Departamento Engenharia Mecânica)

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRE ROCHA PIMENTA
Data: 14/03/2025 21:56:57-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. André Rocha Pimenta (UERJ)

gov.br Documento assinado digitalmente
RICARDO ALEXANDRE AMAR DE AGUIAR
Data: 11/03/2025 14:25:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET /RJ)

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M764 Montani, Uirá Rodrigues da Silveira
Análise da influência do acabamento superficial no desgaste erosivo simulando ataque de cinzas volantes e na resistência à corrosão de revestimentos de FeCr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica / Uirá Rodrigues da Silveira Montani. — 2025.
108f. : il. color. , enc.

Tese (Doutorado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 100-108
Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa
Coorientadora: Marília Garcia Diniz

1. Aspersão térmica. 2. Tubos – Corrosão. 3. Revestimentos em metal. 4. Aspereza de superfície. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses. (Orient.). II. Diniz, Marília Garcia. (Coorient.). III. Título.

CDD 671.734

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar forças para perseverar durante todo o período do meu curso de doutorado.

Agradeço à minha família pelo incentivo para estudar, em especial à minha esposa, Roberta, que sempre esteve ao meu lado, ajudando-me, fortalecendo-me e usando meu exemplo para progredir ainda mais em seus próprios estudos.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa e Prof.ª Dr.ª Marília Garcia Diniz, que, com muita calma, paciência e experiência, me conduziram na concretização do meu doutoramento.

Agradeço à minha atual casa, o Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, e ao meu antigo e eterno lar, a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, instituições que abriram suas portas para mim e me formaram no profissional que sou hoje.

Também agradeço ao Instituto Federal do Rio de Janeiro, Campus Paracambi, na figura do Prof. Dr. André Rocha Pimenta, por executar tanto o processo de retífica de minhas amostras quanto as microscópias eletrônicas de varredura para o EDS. Agradeço, ainda, à VGK Engenharia pela execução do processo de aspersão térmica.

Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, que estiveram presentes nessa trajetória e contribuíram com este trabalho de alguma forma, agradeço de todo o coração.

EPÍGRAFE

Crie muralhas com as pedras que encontrar pelo caminho e pontes para os obstáculos. Mostre para você no espelho, para as pessoas que não acreditaram em você e para aquelas que confiaram, que você não desistiu daquilo que impulsiona todos nós, seres humanos, os sonhos.

Mallerey Cálgara

RESUMO

Análise da influência do acabamento superficial no desgaste erosivo simulando ataque de cinzas volantes e na resistência à corrosão de revestimentos de Fe-Cr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica

Para um projeto seguro e econômico, é fundamental avaliar o desgaste erosivo e corrosivo ou prever suas taxas nos componentes das caldeiras a carvão pulverizado. A proteção dos tubos da caldeira contra erosão causada por cinzas volantes é essencial para manter a eficiência da caldeira. Este estudo propõe um revestimento metálico à base de Fe-Cr-B-Mn, aspergido termicamente pela técnica de arco elétrico, como alternativa para protetiva das áreas mais impactadas dos tubos da caldeira da erosão por cinzas. Foi analisado o impacto de diferentes acabamentos de superfície, obtidos por meio de retífica, na resistência ao desgaste erosivo do revestimento. A aspersão térmica por arco elétrico foi realizada manualmente em um ângulo de 90 graus entre a pistola e a placa, em ar atmosférico. A rugosidade da superfície do revestimento (Ra) foi medida com um rugosímetro, em 2 direções preferenciais, e encontrou-se com valores entre 11 – 17 µm. A retífica foi escolhida como processo de usinagem devido à sua eficiência no acabamento de superfícies pulverizadas termicamente. Três condições foram analisadas: sem acabamento (Ra = 13,08 µm), acabamento superficial intermediário (Ra = 2,495 µm) e acabamento superficial fino (Ra = 0,486 µm). Amostras em todas as condições foram submetidas a testes de erosão de acordo com a norma ASTM G76, usando jateamento de alumina. A superfície foi examinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A morfologia das cicatrizes de usinagem demonstrou um modo de falha frágil de remoção de material durante o esmerilhamento. Além disso, a seção transversal foi investigada usando microscopia óptica. Testes de desgaste erosivo apresentaram taxas médias de erosão de 3,038 x 10-5 g/s, 2,23574 x 10-5 g/s, 2,77325 x 10-5 g/s para acabamentos fino, intermediário e conforme revestido, respectivamente. A resistência à corrosão foi avaliada por polarização potenciodinâmica em NaCl 3,5%, usando eletrodo de calomelano saturado. Os acabamentos superficiais reduziram a densidade de corrente aumentando a proteção anticorrosiva em 14 - 20% em relação ao substrato. Os resultados orientaram a seleção otimizada de materiais e processos para proteger os tubos da caldeira do impacto das cinzas volantes.

Palavras–chaves: Aspersão Térmica, Acabamento Superficial, Jateamento Erosivo, Rugosidade, Corrosão.

ABSTRACT

Analysis of the influence of surface finish on erosive wear simulating fly ash attack and on the corrosion resistance of Fe-Cr-B-Mn-Si coatings obtained by thermal spraying

For a safe and cost-effective project, it is essential to assess erosive and corrosive wear or predict their rates in pulverized coal boiler components. The protection of boiler tubes against erosion caused by fly ash is essential for maintaining boiler efficiency. This study proposes a metallic coating based on Fe-Cr-B-Mn, applied using the electric arc thermal spray technique, as an alternative for protecting the most impacted areas of boiler tubes from ash erosion. The impact of different surface finishes, obtained through grinding, on the erosive wear resistance of the coating was analyzed. The electric arc thermal spray was performed manually at an angle between the gun and the plate of 90 degrees, in atmospheric air. The coating's surface roughness (Ra) was measured with a rugosimeter, in 2 preferential directions, was found to have values between 11 – 17 μm. Grinding was chosen as the machining process due to its efficiency in finishing thermally sprayed surfaces. Three conditions were analyzed: as-coated (Ra = 13.08 μm), the intermediate surface finish (Ra = 2.495 μm), and the surface fine finish (Ra = 0.486 μm). Samples in all conditions were submitted to erosion tests according to ASTM G76, using alumina blasting. The surface was examined by scanning electron microscopy (SEM). The morphology of machining scars demonstrated a brittle failure mode of material removal during grinding. Additionally, the cross-section was investigated using optical microscopy. Erosive wear tests presented average erosion rates of 3.038×10^{-5} g/s, 2.23574×10^{-5} g/s, 2.77325×10^{-5} g/s for fine, intermediate, and as-coated finishes, respectively. Corrosion resistance was evaluated by potentiodynamic polarization in 3.5% NaCl using a saturated calomel electrode. Surface finishes reduced current density as roughness decreased, enhancing anticorrosive protection by 14 - 20% compared to the substrate. The results guided the optimized selection of materials and processes to protect boiler tubes from fly ash impact.

Keywords: Thermal Spray, Surface Finishing, Rugosity, Erosive Wear, Corrosion.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Área

AISI - American Iron and Steel Institute

Al - Alumínio

AL_2O_3 - Óxido de alumínio

Al_3O_3 Óxido de alumínio

Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASP - Arc Spray Process

ASTM - American Society for Testing and Materials

AT - Aspersão térmica

B - Boro

C - Carbono

Co - Cobalto

CO_2 - Dióxido de carbono

Cr - Cromo

Cr_3C_2 - Carbeto de cromo

EDS - Espectroscopia Dispersiva de Energia

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

H_2S - Sulfeto de hidrogênio

H_2SO_4 - Ácido sulfúrico

HCl - Ácido clorídrico

HV - Microdureza Vickers

HVOF - High Velocity Oxigen Fuel

KCl - Cloreto de potássio

KOH - Hidróxido de Potássio

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

Mn - Manganês

MO - Microscopia óptica

Mo - Molibidênio

MPa - Mega Pascal

NaCl - Cloreto de sódio

Nb - Nióbio

Ni - Níquel

O_2 - Oxigênio

ºC - Graus Celsius

R_a - Rugosidade média

SE - Secondary electons

Si - Silício

SiC - Carbeto de silício

SO_2 Dióxido de enxofre

TBCs - Thermal barrier coatings

W - Tungstênio

WC - Carbeto de tungstênio

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema simplificado de uma planta térmica.....20

Figura 2 - Esquema simplificado de usina a carvão pulverizado.....22

Figura 3: Elementos da caldeira de maior vulnerabilidade ao desgaste erosivo-corrosivo.....24

Figura 4: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 30°.....28

Figura 5: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 60°.....28

Figura 6: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 90°.....29

Figura 7: Interface Refratário-Parede de água. As partes marcadas com X apresentam forte desgaste.....31

Figura 8: Formação de Vórtice na Interface Refratário-Parede de água.....31

Figura 9: Formação de degrau na interface tubo – revestimento devido ao ataque erosivo.....36

Figura 10: Esquema dos diferentes passos do processo de aspersão a plasma e esquema do revestimento aspergido.....41

Figura 11: Processos de Aspersão Térmica de Acordo com a Fonte de Energia. Onde HVOF - Chama oxi-gás de alta velocidade, HVAF – Aspersão a ar-combustível de alta velocidade, Flame Spray - Chama Convencional ou Oxiacetilênica, Cold Spray - Aspersão fria, D-Gun – Aspersão por detonação.....42

Figura 12: Esquema da tocha de aspersão por arco elétrico.....43

Figura 13: Tipos de porosidade em um revestimento aspergido termicamente.....48

Figura 14: Micrografia mostrando o resultado do impacto de partícula sólida em uma superfície polida.....52

Figura 15: Micrografia do impacto de partícula sólida sobre superfície polida.....53

Figura 16: Micrografia mostrando o impacto de partícula sólida sobre a superfície de um revestimento com carbetos finos e homogeneamente distribuídos.....54

Figura 17: Chapa revestida após o processo de aspersão.....60

Figura 18: Amostras retiradas da chapa de aço e já revestidas por AT pelo arame da Liga Fe-Cr-B-Mn-Si.....60

Figura 19: Amostras após acabamento de Retífica.....61

Figura 20: Direções preferenciais para a medição de rugosidade. A linha preta indica a direção do processo de retifica. A linha vermelha indica a medição paralela e a linha azul indica a medição perpendicular. A amostra com acabamento conforme obtido pela AT também foi avaliada.....63

Figura 21: Cabine de Jateamento e compressor.....64

Figura 22: Suporte de peças com regulagem angular do bico jateador e bico jateador..65

Figura 23: Solução adotada para alcançar uniformidade do jateamento. A alumina era fornecida diretamente do pote e fora da cabine da cabine de jateamento.....66

Figura 24: Erosão em amostras de aço 1020 empregada na calibração. Regiões erodidas destacadas em vermelho. Imagem obtida com celular Samsung Galaxy S10, Zoom 4X. Com escala.....67

Figura 25: (a) Potenciostato modelo PGSTAT204; (b) Célula de corrosão..... 70

Figura 26: Corpos de provas para ensaio de ensaio de polarização potenciodinâmica..71

Figura 27: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na de seção transversal da amostra como recebida do revestimento.....72

Figura 28: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra como recebida do revestimento.....73

Figura 29: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra com acabamento intermediário do revestimento.....73

Figura 30: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra com acabamento fino do revestimento.....74

Figura 31: Aspecto da superfície de amostra como aspergida.....75

Figura 32: Aspecto da superfície de amostra como aspergida.....75

Figura 33: Micrografia eletrônica de varredura de amostra como aspergida em maior detalhe.....76

Figura 34: Micrografia eletrônica de varredura de amostra como aspergida em maior detalhe, mostrando empilhamento de partículas.....77

Figura 35: Micrografia eletrônica de varredura do revestimento apresentando porosidades.....78

Figura 36: Detalhe de porosidades dentro do revestimento, na área demarcada da Figura 35.....79

Figura 37: Presença de partículas não fundidas e microfissuras no revestimento.....80

Figura 38: Superfície submetida a acabamento intermediário.....81

Figura 39: Microtrincas e marcas de usinagem em superfície com acabamento intermediário.....81

Figura 40: Microtrincas e porosidade em superfície com acabamento intermediário....82

Figura 41: Defeitos em superfície submetida a acabamento intermediário.....82

Figura 42: Superfície submetida a acabamento fino.....83

Figura 43: Defeitos em superfície submetida a acabamento fino.....83

Figura 44: Microtrincas e marcas de usinagem em superfície com acabamento fino...84

Figura 45: Aspecto de mecanismo frágil para o arrancamento de material em superfície com acabamento intermediário.....85

Figura 46: Gráfico comparativo entre médias de rugosidade R_a.....87

Figura 47: Gráfico das Taxas de Erosão Médias dos níveis de acabamento.....90

Figura 48: EDS das regiões (a) externa da cratera de jateamento, (b) interna à cratera da amostra como aspergida, (c) interna à cratera da amostra com acabamento fino, (d) interna à cratera da amostra com acabamento intermediário.....92

Figura 49: Curvas do ensaio de polarização potenciodinâmica.....94

Figura 50: Corpos-de-prova após o ensaio de corrosão.....97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química do Substrato.....58

Tabela 2: Composição química do aço ASTM A178.....58

Tabela 3: Composição Química do Arame Usado no Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico.....58

Tabela 4: Parâmetros de Aspersão.....59

Tabela 5: Informações Técnicas do Rugosímetro.....62

Tabela 6: Resultados do Ensaio de Rugosidade por Acabamento e Direção Preferencial.....86

Tabela 7: Médias, Desvios Padrões e Coeficientes de Variações.....86

Tabela 8: Resultados de Calibração $2 \cdot 10^5$ Pa.....88

Tabela 9: Resultados de Calibração com 2,5·105 Pa (2,5 Bar) e 180 s.....88

Tabela 10: Resultados de Calibração $3 \cdot 10^5$ Pa (3 Bar) e 120s.....88

Tabela 11: Resultados de Taxas de Erosão após Jateamento.....89

Tabela 12: Resumo da análise ANOVA.....90

Tabela 13: Resumo da análise ANOVA.....90

Tabela 14: Resultados de potenciais, correntes de corrosão e resistências de polarização do substrato e níveis de acabamento do revestimento.....96

Tabela 15: Eficiências de proteção.....96

SUMÁRIO

Introdução		**16**
1	**Revisão Bibliográfica**	**18**
1.1	Geração de Energia por Queima de Carvão	18
1.2	A Usina Termelétrica	18
1.2.1	Termelétricas a Carvão Mineral	20
1.2.1.1	Carvão Pulverizado (CP)	21
1.2.1.2	O Ambiente da Caldeira	23
1.3	As Cinzas	24
1.4	Desgaste Erosivo	27
1.5	Características dos Tubos de Parede de Água	29
1.5.1	Erosão Causada Pela Ação das Cinzas	32
1.5.2	Corrosão por Temperatura	33
1.6	Proteção Contra o Desgaste	35
1.6.1	Revestimentos de Proteção	36
1.6.1.1	Comportamento dos Revestimentos sob impactos de Partículas	39
1.6.2	A Aspersão Térmica	40
1.6.2.1	Processos e Técnicas de Aspersão Térmica	41
1.6.2.2	Aspersão Térmica por Arco Elétrico (AS)	42
1.6.2.3	Preparação da Superfície	44
1.6.2.4	Propriedades dos Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica	44
1.6.2.5	Aderência	45
1.6.2.5.1	Fatores que Influenciam a Aderência	46
1.6.2.6	Tensões Residuais	46
1.6.2.7	Porosidade	47
1.6.2.8	Taxas de Erosão	50
1.6.2.8.1	Efeito da Microestrutura	51
1.6.2.8.2	Influência da Porosidade na Taxa de Erosão	54
1.6.2.8.3	Influência do Fluxo de Partículas	55
1.6.2.8.4	Influência do Acabamento Superficial Inicial no Desgaste Erosivo	55
1.6.2.8.5	Influência do Acabamento Superficial Inicial na Resistência à Corrosão	57
2	**Materiais e Métodos**	**58**
2.1	Substrato	58
2.2	Revestimento e Composição Química do Arame	58
2.3	Procedimento de Aspersão Térmica	59
2.4	Usinagem do Revestimento por Retífica	61
2.5	Medidas de Rugosidade Média	62
2.6	Ensaio de Jateamento Erosivo	63
2.6.1	Calibração do Equipamento	63
2.7	Análise Microestrutural	68
2.7.1	Microscopia Óptica	68
2.7.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	68
2.7.2.1	Análise Morfológica da Superfície do Revestimento	68
2.7.2.2	Análise química semi-quantitativa das superfícies após o	68

	jateamento	
2.7.3	Ensaio de Corrosão por Polarização Potenciodinâmica	69
3	**Resultados e Discussão**	**72**
3.1	Microscopia Óptica	72
3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	74
3.2.1	Revestimento Sem Acabamento	74
3.2.2	Revestimento após Acabamento Superficial	80
3.3	Ensaio de Rugosidade por Acabamento Superficial	85
3.4	Resultados da Calibração	88
3.5	Taxas de Erosão	89
3.6	Análise química semi-quantitativa das superfícies após o jateamento	91
3.7	Ensaio de Corrosão por Polarização Potenciodinâmica	93
4. Conclusões		**98**
4.1. Sugestões para Trabalhos Futuros		99
Referências		**100**

Introdução

Revestimentos aspergidos termicamente são utilizados na indústria para a proteção de componentes submetidos a serviços em condições severas, de oxidação ou abrasão. A técnica de aspersão térmica por arco elétrico, desponta como processo de baixo custo e de possível aplicação no campo.

Os revestimentos obtidos pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico apresentam morfologia característica causada pelo empilhamento de lamelas do material fundido lançado contra o substrato. Devido a esse empilhamento lamelar, a porosidade, a presença de óxidos e partículas não fundidas são características intrínsecas dos revestimentos, podendo causar efeitos deletérios ao permitir o contato do substrato com o meio agressivo ou baixa resistência à abrasão do revestimento quando submetido ao impacto de partículas.

Neste trabalho foi avaliado o comportamento ao desgaste erosivo de um revestimento metálico Fe-Cr-B-Mn-Si, aplicado por aspersão térmica por arco elétrico sobre placas de aço, simulando a situação de aplicação sobre tubos de caldeiras, cujas superfícies foram submetidas a 2 níveis de acabamentos distintos. O substrato usado foi similar a um aço ASTM A 178 - grade D. A escolha do material para o substrato deveu-se à semelhança da sua composição química com aquela dos tubos comumente usados em caldeiras de centrais termelétricas e trocadores de calor. Os resultados obtidos foram comparados ao comportamento do revestimento como fabricado. Para simular a situação de desgaste do revestimento por impacto de cinzas volantes em ambiente caldeira de central termelétrica movida à carvão mineral, foi empregado o ensaio de jateamento erosivo utilizando alumina angular de granulometria 110 μm, em intervalo de tempo e pressão determinados, com ângulo de jateamento de 90º, sobre superfícies do revestimento submetidas a diferentes níveis de acabamento pelo processo de retífica. Foram utilizadas técnicas de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), medidas de rugosidade, análise química semi-quantitativa por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) e ensaio de polarização potenciodinâmica para determinar a suscetibilidade à corrosão localizada das diferentes situações testadas.

As principais contribuições deste trabalho são a aplicação inédita da usinagem por retífica em um novo revestimento metálico, gerando dois níveis distintos de

acabamento superficial, e a análise pioneira de seu comportamento frente ao desgaste erosivo e ao desgaste corrosivo. O estudo investigou a resistência ao desgaste erosivo, simulando o impacto de cinzas volantes, e ao desgaste corrosivo, considerando tanto os dois acabamentos gerados por retífica quanto a condição como fabricada, proporcionando uma compreensão abrangente desses mecanismos de degradação para esse revestimento.

1- Revisão Bibliográfica

1.1 – Geração de energia por queima de carvão

O carvão desempenha um papel vital na geração de eletricidade em todo o mundo. As usinas a carvão atualmente abastecem 37% da eletricidade global e estima-se que o carvão ainda gerará 22% da eletricidade mundial em 2040, mantendo a posição do carvão como a maior fonte de eletricidade em todo o mundo [1].

No Brasil, utiliza-se a energia termelétrica de forma estratégica, pois esta pode ser produzida em uma quantidade constante durante o ano inteiro, diferentemente das hidrelétricas, as quais possuem a produção dependente do nível de rios. Mais especificamente, as termelétricas complementam a matriz energética das hidrelétricas, sendo acionadas predominantemente quando há necessidade, como em períodos de estiagem [1].

Conforme o Banco de informações de Geração, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2020 o Brasil possuía 10.155 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, totalizando 174.790.375,66 kW de potência instalada [2]. No país 3.071 são termelétricas gerando 42.956.261,39 kW de energia, correspondendo a um total de 24,45 % do sistema nacional. O número de termelétricas que utilizam o carvão mineral como fonte de energia no país são 13 unidades, que produzem 3.202.740 kW e respondem por 1,8217 % da capacidade instalada no país [3].

1.2 – A Usina Termelétrica

Uma usina termelétrica é uma planta química que produz energia a partir do calor gerado pela queima de combustíveis fósseis ou por outras fontes de calor, como, por exemplo, a fissão nuclear. O combustível que será consumido seja o fóssil, seja o urânio, será armazenado em parques ou depósitos próximos às usinas. A fonte de calor oriunda da queima dos combustíveis é responsável pelo aquecimento de uma caldeira cheia d'água, gerando vapor d'água em alta pressão. Consequentemente, o vapor sob alta pressão e temperatura, se expande e movimenta as pás de uma turbina acoplada a um gerador [4]. Assim, a potência mecânica obtida pela passagem do vapor através

da turbina, que aciona o gerador é que é transformada em potência elétrica. A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para adequada condução, através de linhas de transmissão, até os centros de consumo (SIGEL, 2016) [5].

Após o vapor d'água ter movimentado as turbinas, ele é enviado a um condensador para ser resfriado e, logo em seguida, transformado em água líquida para ser reenviado à caldeira, iniciando um novo ciclo. Esse vapor pode ser resfriado utilizando a água de um rio, um lago ou um mar, mas esse processo de resfriamento causa danos ecológicos devido ao aquecimento da água e, consequentemente, uma diminuição da concentração do oxigênio dissolvido. Outra maneira de resfriar esse vapor é utilizando água armazenada em torres. No final do processo, esta água é enviada em forma de vapor à atmosfera, podendo alterar o regime de chuvas [4].

O processo usual de combustão do carvão em usinas termelétricas envolve diversas etapas: primeiro, o carvão é extraído do solo, fragmentado e transportado até a usina, onde é armazenado em grandes montes; em seguida, correias transportadoras conduzem o material até a área de preparação do combustível, onde passa por uma trituração inicial e, posteriormente, é pulverizado em moinhos; após atingir a granulometria adequada, o carvão é depositado em silos de armazenamento; por fim, ele é encaminhado desses silos para a fornalha da caldeira, onde é injetado e queimado por meio de quimadores específicos. O esquema simplificado de uma planta térmica é apresentado na Figura 1 [5].

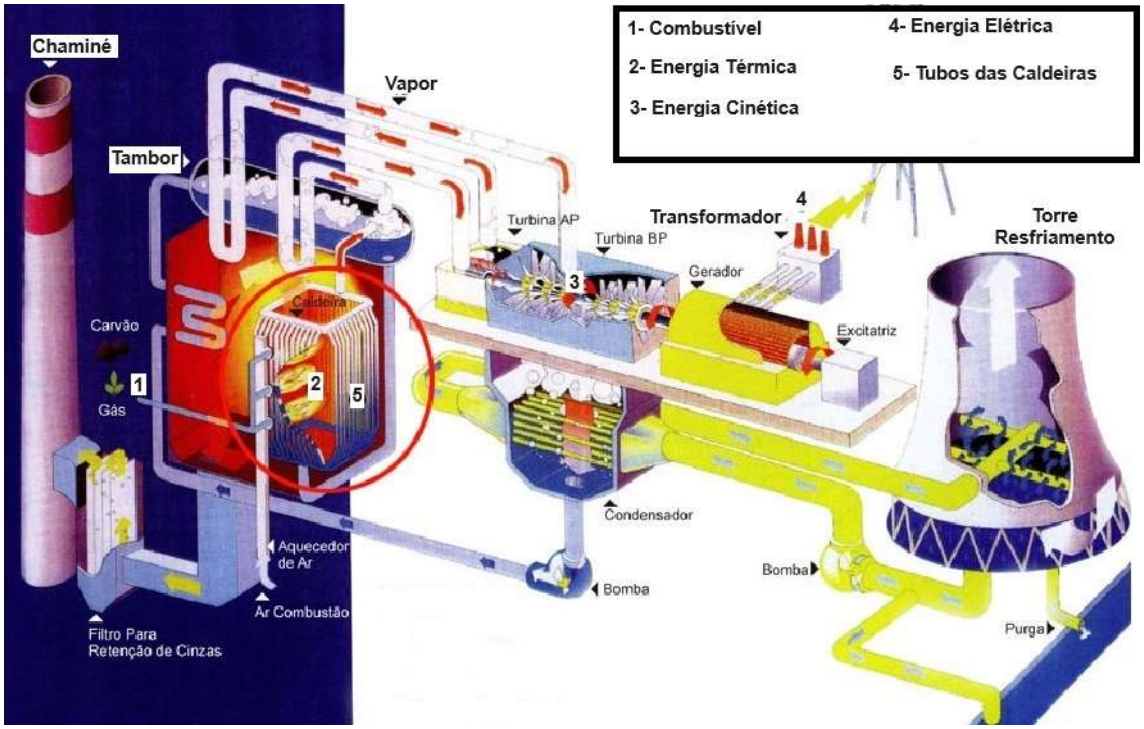


Figura 1: Esquema simplificado de uma planta térmica [5].

1.2.1 – Termelétricas a Carvão Mineral

O carvão, a exemplo do que ocorre com os demais combustíveis fósseis, é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos. Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos, a saber: a) a turfa, de baixo conteúdo carbonífero, constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; b) o linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; c) o carvão betuminoso ou hulha, mais utilizado como combustível, contém cerca de 75% a 85% de carbono é um dos mais puros carvões; e; d) o antracito apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%. Da mesma forma, os depósitos variam de camadas relativamente simples e próximas da superfície do solo e, portanto, de fácil extração e baixo custo, a complexas e profundas camadas, de difícil extração e custos elevados [1].

Há quatro divisões principais em termoelétricas a carvão, que são turbina, caldeira, sistema de manejo de carvão e sistema de manejo de energia. Dentro dessas divisões, a caldeira é uma peça crucial e crítica numa usina termelétrica a carvão. Os principais componentes da caldeira são as paredes, economizadores, aquecedores de ar, e tubos do superaquecedor [6].

1.2.1.1 – Carvão Pulverizado (CP)

A tecnologia de carvão pulverizado para a geração de energia elétrica foi primeiramente testada em 1918 pela *Milwaukee Electric Railway and Light*, em uma caldeira da planta de *Oneida Street*. Em 1921, a unidade *Lakeside Power* de 40 MW se tornou a primeira planta do mundo a entrar em serviço com carvão pulverizado, fornecendo vapor a 22 bar/322 ºC. A unidade queimava carvão betuminoso e sua eficiência média era de ~24% HHV (*higher heating value*) [6].

O método de Combustão de Carvão Pulverizado (*PCC - Pulverized Coal Combustion System*) é a abordagem predominante para a queima de carvão na geração de eletricidade em escala global. Esse sistema foi aperfeiçoado ao longo de décadas e atualmente domina o setor, sendo empregado em mais de 90% das instalações em operação ao redor do mundo.

Nesse processo, o carvão passa por um beneficiamento e é transformado em um pó fino antes de ser transportado pneumaticamente para a caldeira, misturado com ar de combustão primário e injetado através de múltiplos bicos queimadores. Além disso, ar secundário e, em certas situações, ar terciário também são utilizados para otimizar a combustão. A temperatura operacional varia entre 1300 e 1500°C, dependendo das características do carvão, e o tempo médio de permanência do combustível dentro da caldeira fica entre 2 e 5 segundos [5].

Essa tecnologia pode ser aplicada a diversos tipos de carvão, embora apresente limitações para aqueles com altos teores de cinzas – um aspecto que será explorado posteriormente [5].

A maioria das caldeiras emprega um sistema conhecido como "fundo seco", no qual a maior parte das cinzas resultantes da queima do carvão é transportada juntamente com os gases de exaustão. Isso torna essencial a utilização de mecanismos eficazes para a remoção de partículas desses gases. Em algumas situações, são adotados queimadores ciclônicos, que permitem a combustão de carvão com partículas de maior tamanho. As caldeiras de combustão de carvão pulverizado (PCC) foram projetadas para se adequar às capacidades das turbinas a vapor, cujas potências variam de 50 MW a 1300 MW [5].

Nos métodos atuais de combustão de carvão pulverizado (ver Figura 2), o combustível é queimado em minúsculas partículas, o que maximiza a eficiência do processo e melhora significativamente a conversão de energia. As tecnologias mais avançadas de combustão pulverizada conseguem alcançar até 99% de eficiência na queima do carvão [5].

Quando se trata da conversão de calor em eletricidade, usinas que operam com ciclos a vapor supercrítico, em temperaturas próximas de 600°C, podem atingir uma eficiência de até 43%. Embora existam possibilidades de melhorar ainda mais esse rendimento, os custos adicionais tornam essas otimizações pouco viáveis no cenário atual. No Brasil, todas as usinas em funcionamento ou em fase de construção utilizam a tecnologia de combustão pulverizada em ciclos subcríticos. Essa tecnologia pode ser considerada uma alternativa de combustão menos poluente quando combinada com sistemas avançados para o controle de óxidos de nitrogênio (NOx), dessulfurização dos gases de exaustão (FGD) e filtragem de material particulado. Os sistemas FGD podem empregar calcário ou amônia como agentes absorventes, permitindo a eliminação de até 96% do enxofre e quase 100% das partículas sólidas presentes nos gases liberados [5].

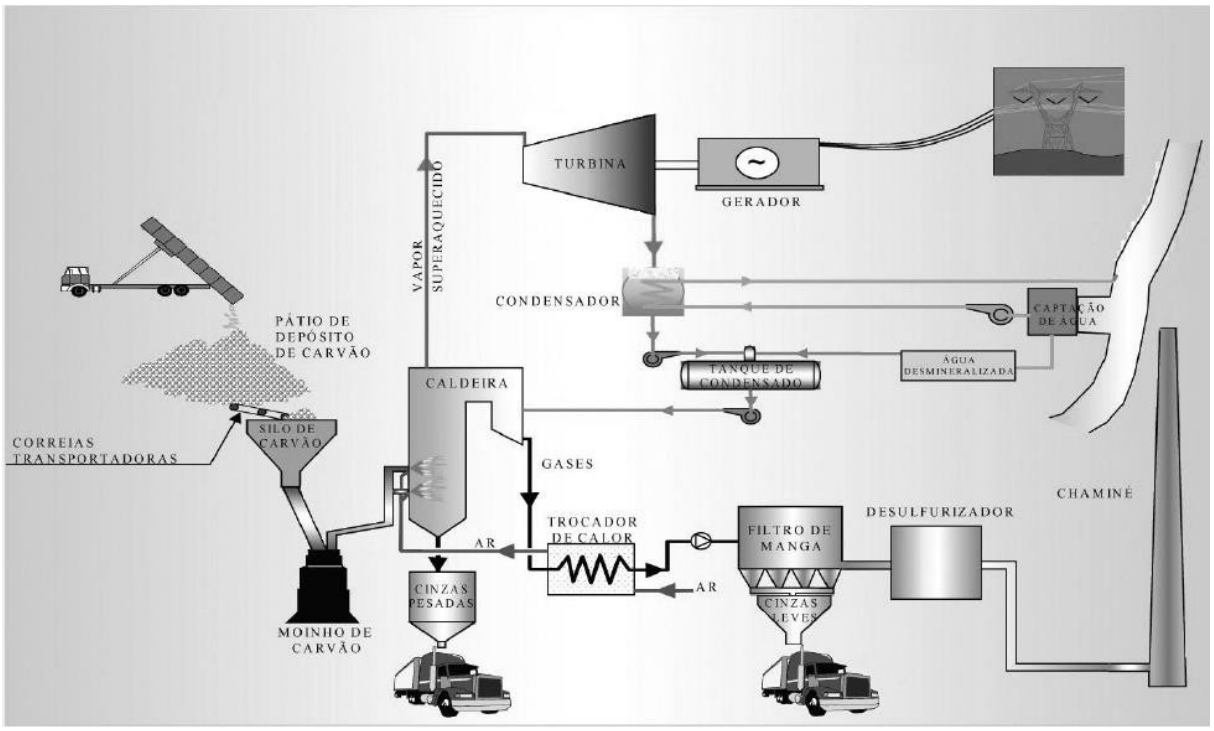


Figura 2: Esquema simplificado de usina a carvão pulverizado [5].

1.2.1.2 – O Ambiente da Caldeira

Na maioria das usinas termelétricas, o carvão é queimado para transformar água em vapor, que é expandido através de uma turbina para gerar energia. Durante a operação, partículas geradas como resíduo da combustão do carvão pulverizado, chocam-se contra os tubos da caldeira resultando em erosão (retirada de material devido ao choque). Simultaneamente, compostos corrosivos que também podem ser gerados no processo, são depositados nos tubos da caldeira (tubos do super-aquecedor e parede de água). Tudo isso reduz a taxa de transferência de calor no sistema como ativa mecanismos de corrosão [7]. Uma visão esquemática da caldeira está apresentada na Figura 3.

O desgaste das caldeiras é primordialmente uma função dos materiais no local, das condições de fluxo de gás e do projeto da caldeira. A taxa de desgaste pode ser aumentada graças a falhas de projeto, irregularidades das estruturas e má escolha de materiais. Em uma caldeira, qualquer descontinuidade desnecessária nos tubos de parede de água pode alterar a direção no fluxo de partículas, aumentando a degradação do metal. Tais descontinuidades podem surgir devido ao excesso de soldas, ou soldagem incompleta dos tubos. Proteção contra desgastes deve ser provida onde as descontinuidades são inevitáveis [8].

Quando o combustível é queimado, para formar vapor em uma usina de geração de energia, os produtos da combustão (gases de combustão) se movem através da caldeira e o calor é extraído por fluidos que atravessam a tubulação da caldeira. A temperatura dos gases de combustão diminui de 1650º C para 1300º C na fornalha, então de 1300º C para 1000º C nas seções radiantes e, por fim, de 1000º C para 540º C nas passagens convectivas. Recebendo o calor da água e do vapor nos tubos, as temperaturas do metal são substancialmente baixas em comparação com as temperaturas dos gases de combustão: ≤ 400º C nos tubos da parede de água, até 600º- 650º C nos tubos do superaquecedor e do aquecedor, dependendo da localização e do projeto.

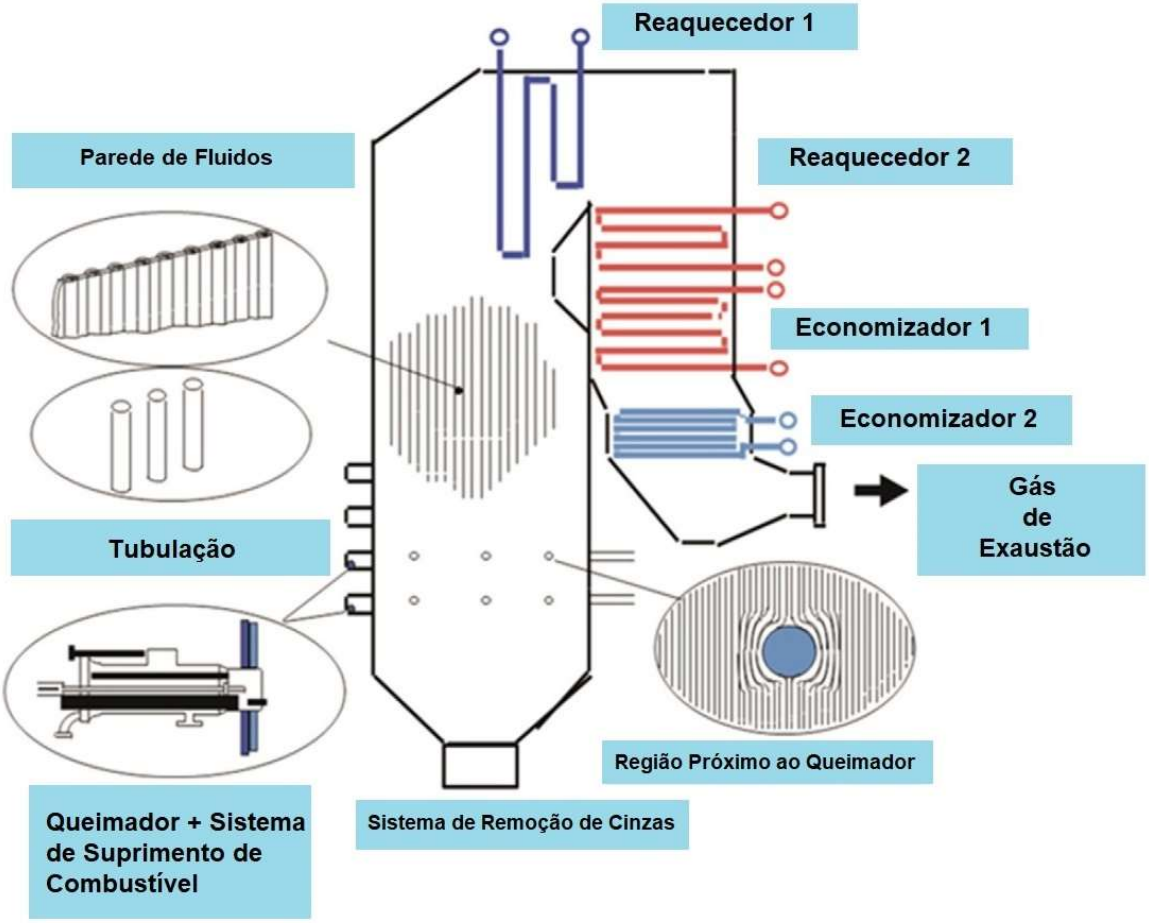


Figura 3: Elementos da caldeira de maior vulnerabilidade ao desgaste erosivo-corrosivo (Adaptado de Szymański, 2015) [9].

1.3 - As Cinzas

O uso do carvão mineral como matéria de queima em fontes de energia térmica produz uma grande quantidade de resíduos sólidos classificados como escórias. Estas escórias, também denominadas cinzas podem ser classificadas em dois tipos: cinzas volantes (leves) e cinzas de fundo (pesadas). Somente o Brasil é responsável por gerar cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas anuais, sendo que 80% dos resíduos são cinzas leves [10].

De acordo com Zheng *et al.* (2018), a queima de combustíveis fósseis resulta em sérios problemas relacionados a cinzas, tais como corrosão, erosão, incrustação, e escórias e podem eventualmente causar a redução da eficiência da caldeira e, consequentemente, causar a parada inesperada do equipamento. Contudo, alterações no projeto da caldeira foram elaborados para minimizar o impacto negativo das

incrustações e escórias, problemas inesperados ainda podem ocorrer em diferentes localizações inacessíveis à limpeza ou onde a ligação entre os depósitos e as paredes é muito forte para que o sistema de limpeza seja eficiente. O comportamento da matéria inorgânica que é dependente da forma de ocorrência e da composição dos inorgânicos, atua de forma importante no projeto das caldeiras e na seleção dos combustíveis sólidos. Alguns problemas podem ser identificados e eles incluem [11]:

- Transporte de partículas e mecânica dos fluidos;
- O processo de formação da cinza;
- Transferência de calor através do depósito de cinza;
- Propriedades e resistência do depósito;
- Estrutura do depósito e sua influência no fluxo de gás na caldeira;
- Os efeitos da deposição de cinza nas condições de combustão.

Por outro lado, as correlações entre o aumento de doenças respiratórias e poluição por matérias particuladas na atmosfera, demandam plantas com alta regulação de emissões das cinzas [12].

Em relação às cinzas trata-se de um material pozolânico, que segundo a NBR-12653 (2014) e a ASTM C618-15, são designados como silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, entretanto, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o Hidróxido de Cálcio (CaOH) à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes [13].

As cinzas leves apresentam como constituintes principais os compostos químicos e Cristais de Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxido Férrico (Fe_2O_3) e Cal (CaO). Em quantidades substancialmente inferiores, podem existir outros componentes como MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, MnO e TiO_2. A norma ASTM C618 (2015) [14] classifica as cinzas leves baseada na sua composição química, principalmente na soma de três óxidos: SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. Os dois tipos e os requisitos primários exigidos pela norma são os seguintes: Classe F ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$); e Classe C ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 50\%$). As cinzas leves da Classe C apresentam geralmente teor de CaO maior que 20% [15].

Goodarzi *et al.* [16] obteve características de cinzas leves de termelétricas localizadas no Canada. Em análise, as partículas presentes apresentaram morfologia predominantemente esférica e de tamanho irregular, devido a composição da cinza formada por óxidos de diferentes composições. Foi abordado o fato da matéria mineral

das cinzas, como o quartzo e feldspatos presentes, serem causadores do desgaste em máquinas e agentes de problemas de saúde.

No campo mineralógico, é usual o emprego da escala Mohs para classificar minerais por suas características físicas [17]. A dureza de alguns minerais e outros constituintes em escala Knoop e Vickers é apresentada por Davis *et al.* [18], com a informação para o valor do quartzo variando entre 900 – 1280 HV.

Schaeffer *et al.* [19] produziu uma sinterização de cinzas da queima de carvão mineral com alumínio e parafina e realizou medidas de dureza no material sinterizado, encontrando valor médio de 781,93 ± 56 HV0,2.

O fenômeno de adesão e deposição das partículas de cinzas a altas temperaturas nas paredes dos superaquecedores e trocadores de calor impede a operação longa e estável de sistemas de geração de energia por carvão [20]. Os mecanismos conhecidos de deposição envolvem várias rotas: as partículas de cinza se movem e colidem com a superfície da área de deposição como resultado dos efeitos de inercia, forças termoforéticas e outros mecanismos. Durante o acúmulo e crescimento das camadas depositadas de cinzas, o impacto e eficiência da captura de partículas de cinza na superfície de um superaquecedor são afetados por fatores como densidade das partículas, velocidade e condições de fusão das partículas aderidas [12].

Gomes *et al.* [22], após uma detalhada caracterização química, geométrica, dimensional e mecânica das partículas resultantes da queima de carvão mineral utilizados em centrais termelétricas brasileiras, concluiu que as partículas de cinzas apresentaram um aspecto morfológico predominantemente esférico e de diâmetros variados (diâmetro médio de 20,19 ± 12,05 μm), com a presença de uma combinação principalmente de alumina, sílica e óxido de ferro e que revelaram ter um caráter básico com pH = 9,4. Foram observadas partículas apresentando elementos maciços e com vazios internos (partículas ocas). O valor médio para microdureza de amostras do particulado foi de 1024 HV0,1 ± 300, o método utilizado por Gomes *et al.* serviu para a investigação de valores de dureza das partículas individuais de cinzas e não de um material sinterizado.

1.4 – Desgaste Erosivo

Desgaste erosivo refere-se à situação em que a remoção progressiva de material, de uma superfície sólida é causada pela interação mecânica entre a superfície e partículas sólidas que estão contidas numa corrente de líquido ou gases [23].

É bem conhecido que ao tratar de desgaste erosivo diferentes regimes de desgaste, e mecanismos de degradação dependem das propriedades superficiais do material e alguns parâmetros como ângulo de impacto, morfologia e velocidade da partícula, temperatura da superfície do material e temperatura da partícula e o impacto turbulento das partículas [24].

O impacto de partículas sólidas é o fenômeno que afeta muitos componentes mecânicos, paredes e tubulações de turbinas, age causando a perda progressiva de material pelo impacto repetitivo de partículas abrasivas nas superfícies. Todavia, o impacto de partículas sólidas pode ser empregado em outras aplicações como jateamento de areia, desbaste abrasivo, jateamento por gelo seco e corte por jateamento de água e abrasivo [24]. Em seu estudo sobre o comportamento do aço inoxidável AISI 310 sob a ação de jateamento abrasivo turbulento a 450 ºC de partículas de SiC, com granulometria de 300 µm, morfologia angular, 95,7% de pureza, Zaragoza-Granados *et al.* [24] mostram que os mecanismos de desgaste encontrados nas condições analisadas, foram deformação plástica, fissuração e alguns traços de arrancamento de material (Figuras 4, 5 e 6). O processo erosivo primeiramente produz endentações causadas pelas partículas abrasivas seguidas por impactos secundários que geraram picos achatados de deformação plástica, consecutivamente há a perda de material por fratura causada por impactos consecutivos [24].

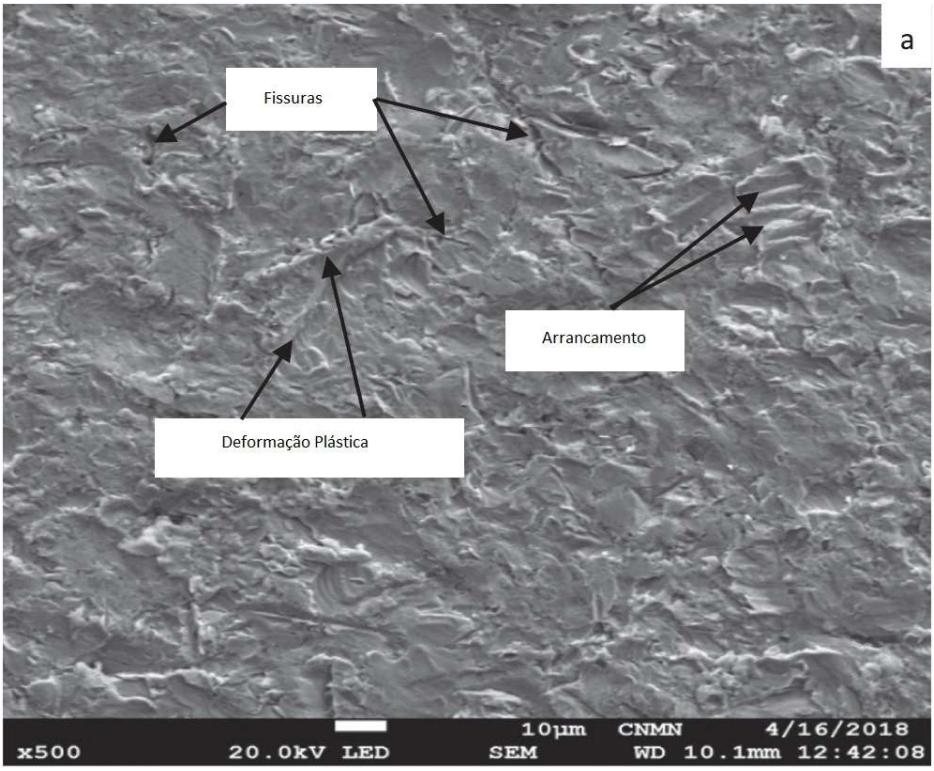


Figura 4: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 30° (Adaptado de Zaragoza-Granados, 2019) [24].

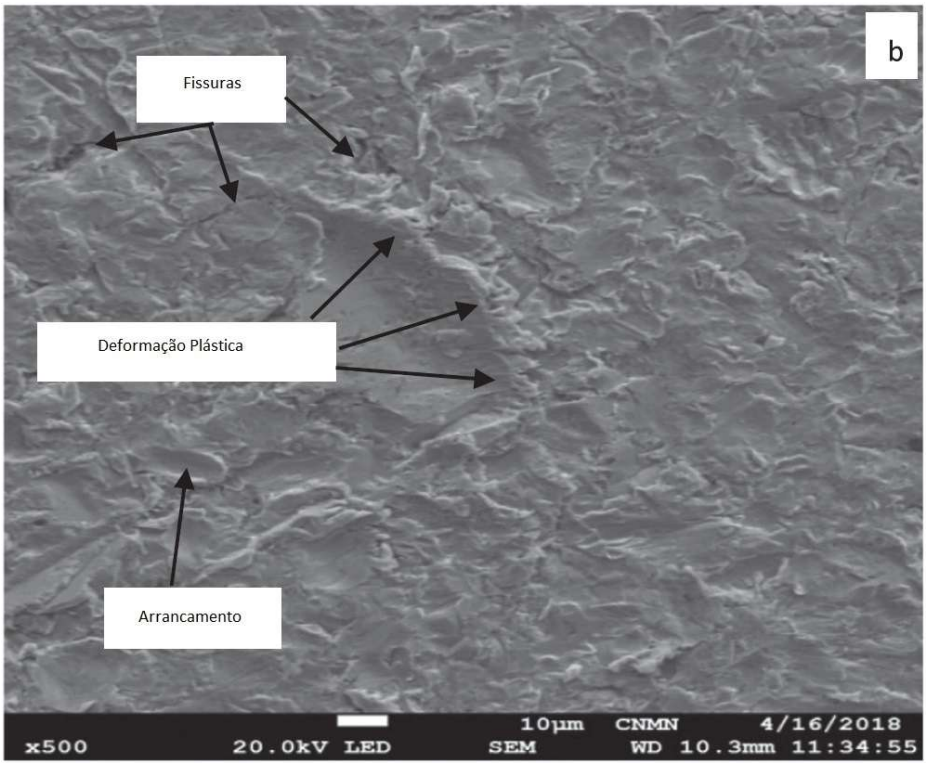


Figura 5: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 60° (Adaptado de Zaragoza-Granados, 2019) [24].

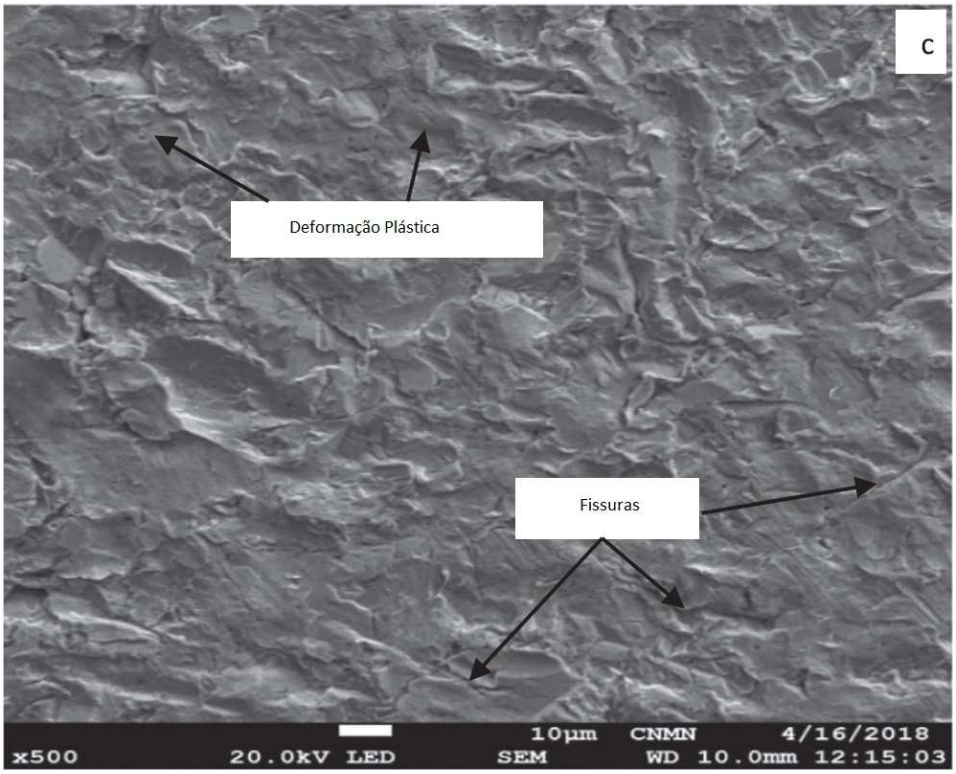


Figura 6: Características do desgaste em fluxo não-turbulento a 90° (Adaptado de Zaragoza-Granados, 2019) [24].

A ação simultânea de oxidação a alta temperatura e erosão mecânica na superfície metálica constituem um mecanismo de desgaste do metal em muitos processos, onde a capacidade de resistir a correntes gasosas com particulados é de vital importância. Caldeiras sofrem de problemas severos de erosão e corrosão, que resultam em perdas substanciais [26].

1.5 – Características dos Tubos da Parede de Água

Dentre todos os componentes das superfícies aquecidas da caldeira, a transferência de calor na parede de água apresenta um papel crucial, pois também determina a quantidade de energia deixando a fornalha para a passagem de convecção da caldeira e a subsequente transferência de calor convectiva para as superfícies aquecidas. A transferência de calor na parede também afeta diretamente o nível total de temperatura da fornalha, que subsequentemente afeta a combustão do carvão e a formação de processos poluentes. A distribuição de temperatura na parede da fornalha, que é diretamente relacionada à distribuição do fluxo de aquecimento da parede, é

também um fator-chave associado aos vários problemas específicos da caldeira como superaquecimento dos tubos e corrosão a alta temperatura [27].

A distribuição de temperatura na parede da fornalha é altamente desuniforme, variando dramaticamente com a distribuição do fluxo de calor e altamente dependente das condições de depósito de cinzas na parede. Na parte baixa da caldeira, onde a temperatura da chama é alta e a transferência de calor por radiação é intensa, a temperatura na superfície da parede é substancialmente mais alta que aquela no topo da fornalha. Por outro lado, nas áreas com forte depósito de cinzas, uma vez que a cinza impede a transferência de calor através da parede de água, a temperatura na parede tende a aumentar substancialmente. Isso leva a um aumento substancial de auto-radiação e, assim, reduz a absorção de calor na parede da fornalha [27].

Tubos da parede de água apresentam dois problemas principais: perda de espessura e perfuração pela ação erosiva das cinzas ou perfuração pela ação corrosiva dos compostos gerados pela queima do carvão mineral [28].

Segundo informado por Costa *et al.* [29], o problema se agrava com a condensação dos vapores d'água sobre a superfície dos tubos, pois estes podem sofrer ininterruptos ataques de compostos químicos altamente corrosivos se estes estiverem contidos no condensado, como o ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Por algum tempo, a corrosão a alta temperatura, em tubos de caldeiras que utilizam combustível fóssil, não foi considerada um problema significante nos Estados Unidos. A perda gradual de material na parede, era geralmente menor que 0.25 mm/ano. Contudo a mudança para queimadores com Óxido Nitroso (NOx) foi acompanhada pelo aumento na perda de material, na ordem de 1 a 2, 5 mm/ano em unidades subcríticas [28].

A fornalha inferior da caldeira possui material refratário revestindo até certa altura para evitar abrasão e corrosão excessivas dos tubos de parede de água (Figura 7). A interface entre o revestimento refratário e a área exposta dos tubos é sujeita a desgaste extensivo. A deterioração nessa região é atribuída ao denso fluxo descendente de sólidos ou a formação de vórtices, conforme Figura 8 [8].

O fluxo descendente de partículas sólidas causa a erosão tanto do tubo quanto do revestimento refratário. A taxa de erosão também é afetada pela taxa de refluxo de sólidos na fornalha. Modificação em outras regiões na caldeira afeta a hidrodinâmica, e assim, afeta a taxa de erosão [8].



Figura 7: Interface Refratário-Parede de água. As partes marcadas com X apresentam forte desgaste [8].

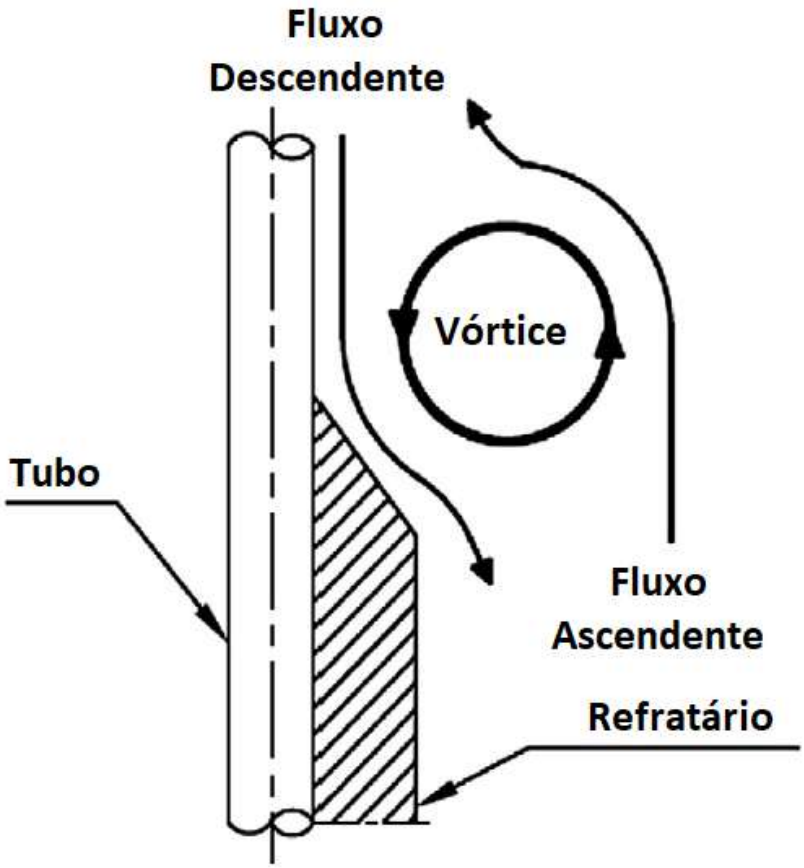


Figura 8: Formação de Vórtice na Interface Refratário-Parede de água (Adaptado de Arjunwadkar, 2016) [8].

1.5.1 – Erosão Causada pela Ação das Cinzas

Dos vários tipos de erosão observados em caldeiras de usinas elétricas (erosão por escorva de fuligem, erosão por escória em queda e erosão por partículas de carvão), a erosão por cinzas é a mais importante.

As partículas de cinzas em suspensão, arrastadas e formando um leito fluidizado, impactam as superfícies dos tubos da caldeira e são depositadas nesses componentes, causando desgaste erosivo, oxidação ou corrosão por temperatura. Em estágios avançados de degradação dos materiais desses componentes, a vida-útil das caldeiras e suas peças é reduzida. Isso pode gerar paralização da usina termelétrica para manutenção [30].

Um fator chave na propensão a danos por ação de cinzas em suspensão (“fly ash”) é o conteúdo de quartzo do carvão. Algumas das partículas de quartzo passam através da chama no forno sendo relativamente inalteradas ou somente vitrificadas na superfície; ambas as formas são altamente abrasivas.

O mecanismo de dano na erosão pela ação das cinzas é direto: o material do tubo é removido, como em qualquer processo clássico de erosão de partículas sólidas, ou indiretamente na camada protetora da lareira, que permite o acesso ao metal de base por gases de combustão [23]. As variáveis de erosão são ângulo de colisão de partículas, velocidade de partícula, tamanho da partícula, forma e resistência da partícula, propriedades da superfície do material a ser atacado [31].

Mais de 25% das falhas em caldeiras são devidas à erosão por ação de cinzas em suspensão. Mais de 50% em caldeiras a carvão de termelétricas se deram por corrosão ou erosão a quente. O processo de erosão-corrosão leva a uma redução de espessura nos tubos das caldeiras em condição de trabalho, finalmente culminando na ruptura repentina dos tubos. O processo erosivo-corrosivo é identificado como a maior razão de paradas em termelétricas, representando entre 50% a 75% do tempo total [32].

1.5.2 - Corrosão por Temperatura

Corrosão pode ser definida como a deterioração das propriedades intrínsecas do material devido à reação deste com o seu ambiente. Considerando um ambiente com temperaturas elevadas, tal como o de caldeiras, a cinética do processo de corrosão pode ser intensificada. Ela pode ser causada pela reação de fases gasosas com metais ou depósitos ou uma combinação de ambos. Enxofre, Vanádio (V), Cloro (Cl) e metais alcalinos são também responsáveis pela corrosão nas caldeiras [8].

Conforme já dito, dentro da usina, o carvão é pulverizado em pó fino, a partir de grandes moinhos. Isso ocorre porque o carvão pulverizado queima rapidamente, como gás. O carvão em pó é soprado no forno da caldeira, onde ele queima. Caldeiras são projetadas para usar a energia liberada pelo carvão em combustão para aquecer a água da forma mais eficiente possível [34].

Dois grandes ventiladores fornecem ar atmosférico, pré-aquecido em aquecedores de ar a aproximadamente 250ºC, ar de combustão para a caldeira. O fogo dentro da caldeira é iniciado pela injeção de óleo combustível a alta pressão na fornalha através dos bicos. O óleo é atomizado e depois aceso com um sistema de ignição por gás propano,a temperatura dentro do forno é de ± 1200ºC a plena carga [34].

Como partículas de carvão são introduzidas na chama, umidade e partículas voláteis são eliminadas, partículas de carbono começam a queimar e matéria metálica contaminada pode ser derretida ou vaporizada. Várias espécies gasosas são criadas ou liberadas pela combustão: Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de Carbono (CO), vapor de água, Nitrogênio. Adicionalmente, esses gases podem conter potenciais substâncias corrosivas como: Enxofre, Dióxido de Enxofre (SO_2) e Sulfito de Hidrogênio (H_2S), bem como vapores de sais alcalino-metálicos e compostos clorados, como Ácido Clorídrico (HCl). O Enxofre (S) quando presente no gás combustível causa a sulfação de Fe, Ni, Cr presentes no material do tubo, resultando na formação de sulfatos ou sulfitos. Compostos de Vanádio no gás combustível reagem com óxidos ou sulfatos no metal, aumentando assim a taxa de corrosão [8].

Os mecanismos de corrosão à alta temperatura nas paredes de água têm sua ocorrência creditada essencialmente à presença de S no sistema. A combustão incompleta da Pirita (FeS_2), sob condições de redução, gera Sulfeto de Ferro (FeS) que se deposita nos tubos. Apesar do FeS ser essencialmente inerte para os aços de tubos

de caldeiras, estes depósitos ricos de FeS decompõem-se, sob condições oxidantes, em Magnetita (Fe_3O_4), Ácido Sulfídrico (H_2S), Sulfeto Carbônico (COS) e Dióxido de Enxofre (SO_2). Este é um ambiente muito corrosivo para as tubulações de aço. Ele pode ser gerado por mudanças de carga, nas quais regiões localizadas passam por ciclos entre as condições de redução e de oxidação [28].

A situação piora quando o carvão contém mais que 0,05% de Cloro. Sob condições de reação (teor de Oxigênio menor que 0,5% e CO acima de 2%), HCl é formado no gás de combustão e parte dele passa para dentro dos tubos de caldeira. Na interface de metal, o HCl reage com o Ferro (Fe). No entanto, FeCl é instável acima de 450º C, então em algum lugar na interface de metal o FeCl se decompõe em Ferro e Cloro. Quanto maior a quantidade de calor, mais próximo à interface de metal essa dissociação acontece. As quantidades de cloretos depositados dependem do conteúdo de Cloro, Óxido de Sódio (Na_2O) e Óxido de Cálcio (CaO) no carvão. As escamas produzidas no ciclo redução/oxidação contêm sulfetos, cloretos e óxidos misturados. Tipicamente, tais escamas possuem várias camadas e são porosas.

No caso de caldeiras abastecidas por biomassa, os metais alcalinos, Sódio e Potássio formam depósitos nas superfícies do trocador de calor. Depósitos reduzem a taxa de transferência de calor, assim afetando a performance da caldeira. Para prevenir esse fenômeno, sopradores são empregados para remover os depósitos em intervalos regulares. Sozinhos, tais depósitos não danificam o material do tubo, são suas reações complexas com Cl, S e Si que causam corrosão. As moléculas de Cl se difundem através da camada protetiva de óxido e formam cloretos metálicos, que corroem os tubos. O Cl aumenta a volatilidade de metais alcalinos, liberando-os como cloretos ou hidróxidos alcalinos nas fases gasosas. Nas caldeiras abastecidas por biomassa, os problemas mais severos de corrosão são associados a depósitos contendo cloretos alcalinos [8].

Alguns métodos capazes de reduzir a corrosão são [8]:

- Como a taxa de corrosão é mais elevada a altas temperaturas, deve-se manter temperaturas “ótimas” de projeto nas respectivas partes da caldeira para o controle eficiente da corrosão;
- O uso de aditivos para o leito como bauxita, caolinita e calcário produzem compostos com altos pontos de fusão em relação aos cloretos alcalinos. Esses compostos com relativamente altos pontos de fusão reduzem a taxa de formação de depósitos álcali-cloretos corrosivos;

- A caldeira pode ser abastecida com combustível sem Cl por um curto período de tempo durante a partida após a limpeza da caldeira. Isso permite que uma camada de óxido se forme nas superfícies de permutação de calor. Essa camada de óxido protege a superfície do metal até certo nível quando o combustível com Cl é empregado;
- Para prevenir a corrosão na região do superaquecedor a temperatura do metal deve ser baixa. Assim, a temperatura do vapor de saída deve ser mantida abaixo do limite permitido para o determinado combustível. Alternativamente, ligas de aço resistente à corrosão podem ser usadas, entretanto, isso poderá diminuir o rendimento de trocas térmicas do equipamento;
- Para combustíveis que contenham Cl, S deve ser adicionado, pois o S forma preferencialmente sulfatos alcalinos, permitindo que o Cl permaneça nos gases e deixe a caldeira sem ser depositado, causando corrosão.

1.6 - Proteção Contra o Desgaste

As cargas térmicas agressivas aplicadas em termelétricas a carvão são divididas em grupos de acordo com a temperatura de operação, até 800°C, e o conteúdo de particulado. Em um ambiente com gás corrosivo uma pequena quantidade de particulado está presente. Em outro grupo típico, a temperatura cai, contudo, a taxa de particulado aumenta. Várias correlações entre temperaturas e conteúdo de particulados são capazes de causar mudanças no tipo de desgaste (corrosão gasosa, cavitação, abrasão) [36].

A primeira técnica básica para limitar o processo de desgaste erosivo ou erosivo-corrosivo é a otimização do projeto construtivo da câmara de caldeira e a instalação de elementos que, otimizados em forma, atuam na velocidade de escoamento das correntes de particulado e de gases de combustão de tal forma a reduzir ao máximo o desgaste dos elementos críticos da caldeira. Um exemplo de tais soluções são chicanas nos canais de exaustão, chapas de aceleração próximas aos aquecedores, bem como modificações nos cantos da câmara de combustão [9].

Nas regiões onde as modificações construtivas não apresentaram bons efeitos, determinados tipos de materiais são utilizados, combinados com o aumento em sua espessura. Caso não seja suficiente, revestimentos são aplicados, preparados de materiais resistentes ao desgaste [9].

1.6.1 - Revestimentos de Proteção

Os revestimentos protetores aplicados para proteção contra corrosão e desgaste por partículas em altas temperaturas devem se caracterizar por uma microestrutura densa, de alta dureza e boa resistência à erosão e corrosão. Tais propriedades podem ser encontradas em revestimentos produzidos por meio de diversos métodos de aplicação, bem como em revestimentos fundidos [9].

Deve ser observado que a capacidade do revestimento em proteger o material de base (substrato) contra o mecanismo de desgaste não depende apenas da composição e microestrutura do revestimento, mas também de suas propriedades físicas e mecânicas, que relaciona uma dependência da escolha do material inicial, o tipo de processamento e fonte de energia empregado, além da preparação superficial prévia da área a ser protegida [22].

Os revestimentos resistentes ao desgaste não previnem a erosão, no entanto atrasam a falha do tubo. A razão para o sucesso limitado dos revestimentos aspergidos na região de interface com os tubos da parede de água é a formação de um degrau que intensifica o ataque erosivo localizado (Figura 9) [8].

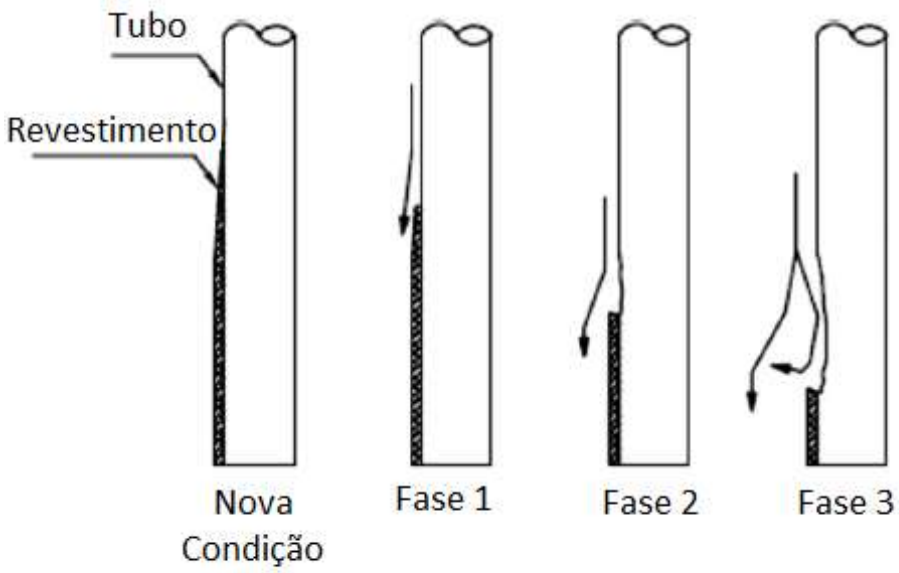


Figura 9: Formação de degrau na interface tubo – revestimento devido ao ataque erosivo (Adaptado de Arjunwadkar, 2016) [8].

Os requisitos para maior durabilidade dos materiais de revestimento em trocadores de calor incluem [28]:

1) O coeficiente de expansão térmica do revestimento deve coincidir com o do material do tubo do substrato;
2) A condutividade térmica do material de revestimento deve ser comparável à do material de substrato;
3) O revestimento deve possuir resistência à corrosão e / ou à erosão;
4) O revestimento deve ser denso e a porosidade no revestimento deve ser tão baixa quanto possível;
5) O teor de óxidos no revestimento deve ser o mais baixo possível (<5%). Os poros interconectados aceleram a taxa de corrosão;
6) A contaminação da interface revestimento / substrato deve ser tão baixa quanto possível (<5%);
7) A superfície das peças a revestir deve estar livre de graxa, óleo e redes de óxidos;
8) O revestimento deve exibir boa força de ligação (força de adesão >70 MPa) e aderir ao substrato sem desprendimento.

Revestimentos resistentes ao desgaste com estrutura de austenita metaestável são de particular interesse, devido aos custos baixos das ligas e alta resistência em várias condições de desgaste mecânico (abrasão, impacto, cavitação). Aqui, a energia de cargas externas, aplicadas à superfície de trabalho é dissipada devido à transformação de austenita em martensita dispersa. Isso melhora a confiabilidade por combinação sinergética do endurecimento da superfície e redução dos das tensões internas [34].

Ligas de Fe-Cr-Al são utilizadas tradicionalmente como revestimentos para proteção contra corrosão gasosa. A resistência térmica da liga de Fe-Cr-Al é provida por uma camada superficial de alumina, formada a altas temperaturas. Essa camada de óxido é caracterizada por uma alta temperatura de fusão, estabilidade térmica e química e baixa taxa de crescimento [34].

O Cromo (Cr) é amplamente adicionado a revestimentos metálicos, com o intuito de aprimorar a resistência à corrosão, uma vez que o Cr forma uma camada passiva de Cr_2O_3 a elevadas temperaturas sem afetar excessivamente as propriedades mecânicas dos revestimentos [35].

A oxidação da matéria-prima Fe-Cr resulta no consumo do Cr, influenciando negativamente na resistência a altas temperaturas do revestimento Fe-Cr. Uma abordagem para reduzir o consumo de Cr durante a aspersão é a adição de Alumínio

(Al) à liga do arame, pois materiais de adição Fe-Cr-Al são pouco oxidados quando aspergidos. As ligas Fe-Cr-Al apresentam boa resistência à oxidação em temperaturas acima de 1000 °C, devido à formação do óxido denso Al_2O_3. No entanto, a adição do Al pode causar a redução das propriedades mecânicas dos revestimentos. Uma outra possibilidade, para reduzir a oxidação é a adição de Boro (B), elemento capaz de reduzir a oxidação das partículas fundidas durante a aspersão. Além disso, a adição de B influencia positivamente no comportamento mecânico dos revestimentos [35].

Revestimentos de Fe-Cr-Al-B aspergidos por arco elétrico preservam suas propriedades de proteção quando a erosão é combinada com a corrosão a temperaturas elevadas. Estes revestimentos apresentam um aprimoramento de 10 a 30 vezes na resistência a temperaturas de 600° a 700 °C em comparação com os aços 12Cr1MoV. A adição de Ítrio (Y) é favorável na proteção contra corrosão gasosa e desgaste abrasivo pelas seguintes razões: Ligas de Fe-Cr-Al que contêm Y demonstraram boa aderência da camada superficial do óxido em processos por Arco Elétrico, durante operações realizadas a altas temperaturas no ciclo térmico. Durante o processo de fabricação do revestimento por arco elétrico a queima dos elementos de liga não pode ocorrer, pois a afinidade do Ítrio com o Oxigênio é maior que a dos outros elementos de liga. Ademais, o Ítrio protege os elementos de liga da oxidação, durante a transição, desde a matéria-prima até o revestimento, e assegura a habilidade dos elementos de liga de resistir à corrosão gasosa e ao desgaste [34].

Revestimentos à base de Níquel (Ni) e Cobalto (Co) representam uma parcela significante dos revestimentos por aspersão térmica. Esses materiais são amplamente utilizados quando se precisa de uma combinação de propriedades, tais como boas resistências ao desgaste e à oxidação simultaneamente. Segundo informa a literatura, a difusão pode ocorrer entre o material do revestimento e o substrato durante o processo de aspersão a plasma, influenciando fortemente na performance do revestimento. Desta forma, a resistência à erosão dos revestimentos depende fortemente do processo de aspersão e do material do substrato [26] [35].

Ligas Ni-Cr também são amplamente usadas como revestimentos para lidar com ambientes oxidantes a altas temperaturas. Quando o Ni é ligado ao Cr, esses elementos oxidam, formando Cr_2O_3 a taxas que permitem o uso a temperaturas até 1200 °C, contudo, na prática, o uso é limitado a temperaturas abaixo de 800 °C. A liga para aspersão térmica 50/50 Ni-Cr é geralmente recomendada como proteção de tubos de caldeiras para geração de energia [35].

Revestimentos aspergidos termicamente ou obtidos por difusão e sobreposições de solda têm sido amplamente utilizados por muitos anos para prolongar a vida útil de ambos os tubos de caldeiras sub e supercríticos. Os materiais de revestimento geralmente contêm um ou mais elementos dos três óxidos protetores conhecidos formadores Al, Cr e Si. Esses elementos formam escamas protetoras de óxidos, Al_2O_3 ou Cr_2O_3, e/ ou SiO_2 quando o revestimento é exposto ao gás de combustão quente. A camada de óxido protetor prolonga a vida em serviço das caldeiras sub e supercríticas [28].

1.6.1.1 - Comportamento dos revestimentos sob impactos de partículas

As condições da caldeira (temperaturas elevadas, atmosferas oxidantes e impactos por partículas de cinzas) são responsáveis por causar degradação severa dos componentes da caldeira, tais como tubos dos trocadores de calor, por uma combinação de ataque por oxidação e desgaste erosivo [23].

A energia cinética em um fluxo de partículas abrasivas impelidas por um jato de alta velocidade, atinge a superfície de trabalho, removendo material por meio de micro-fraturas geradas pelo impacto. A erosão causada e a rugosidade gerada são proporcionais à energia cinética das partículas. Além disso, o impacto dessas partículas é capaz de gerar camadas de tensões residuais compressivas [36], melhorando as propriedades de absorção de impactos de partículas pelo material, pois gera um campo de tensões capaz de atuar na neutralização das tensões trativas oriundas do processo de arrancamento, minimizando o desenvolvimento e evolução de microfissuras [37] [38]. Todo este processo é desejável que ocorra sobre o revestimento e não diretamente sobre a superfície dos tubos da parede d´água do trocador de calor.

1.6.2 - A Aspersão Térmica

Aspersão Térmica (*Thermal Spray* - TS) é uma técnica de modificação superficial onde o material fundido ou semi-fundido, proveniente de arames ou em pó é propelido na direção da superfície-alvo (Figura 10). A técnica descreve uma família de processos que utilizam de energia química (combustão) ou energia elétrica (plasma ou arco) para fundir e acelerar finas dispersões de partículas a velocidades de 50 até > 1000 m/s. As altas temperaturas e velocidade alcançadas pelas partículas resultam em deformações significativas no impacto com a superfície, produzindo finas camadas ou lamelas, que se conformam aderindo ao substrato. Individualmente, cada lamela apresenta pouca espessura (~1 a 20 μm) e cada partícula esfria em taxas muito altas (>106 K/s para metais) para formar revestimentos de grãos refinados e policristalinos [39],[40].

Revestimentos aspergidos termicamente oferecem proteção eficiente contra corrosão a alta temperatura, erosão, oxidação, desgaste e bactérias. Particularmente, determinados processos de aspersão térmica podem ser aplicados como uma técnica adicional de fabricação ou restauração de componentes danificados [40],[41].

A resistência à tração dos depósitos aspergidos pode variar entre 10 e 60 % quando comparados aos materiais fundidos, dependendo do processo de aspersão empregado. As condições de aspersão levam a maiores níveis de óxidos e baixas densidades de depósitos resultam em resistências menores. Aspersão em atmosferas controladas permitem uma resistência de até ~60%, contudo, requerem tratamentos térmicos pós-deposição. Baixas resistências dos revestimentos estão relacionadas a uma limitada difusão interlamelar e limitada recristalização durante a solidificação rápida. O fator primário para baixa adesão e coesão são as tensões residuais, resultantes da rápida solidificação das lamelas. O acúmulo de tensões residuais também limita a espessura do revestimento [41].

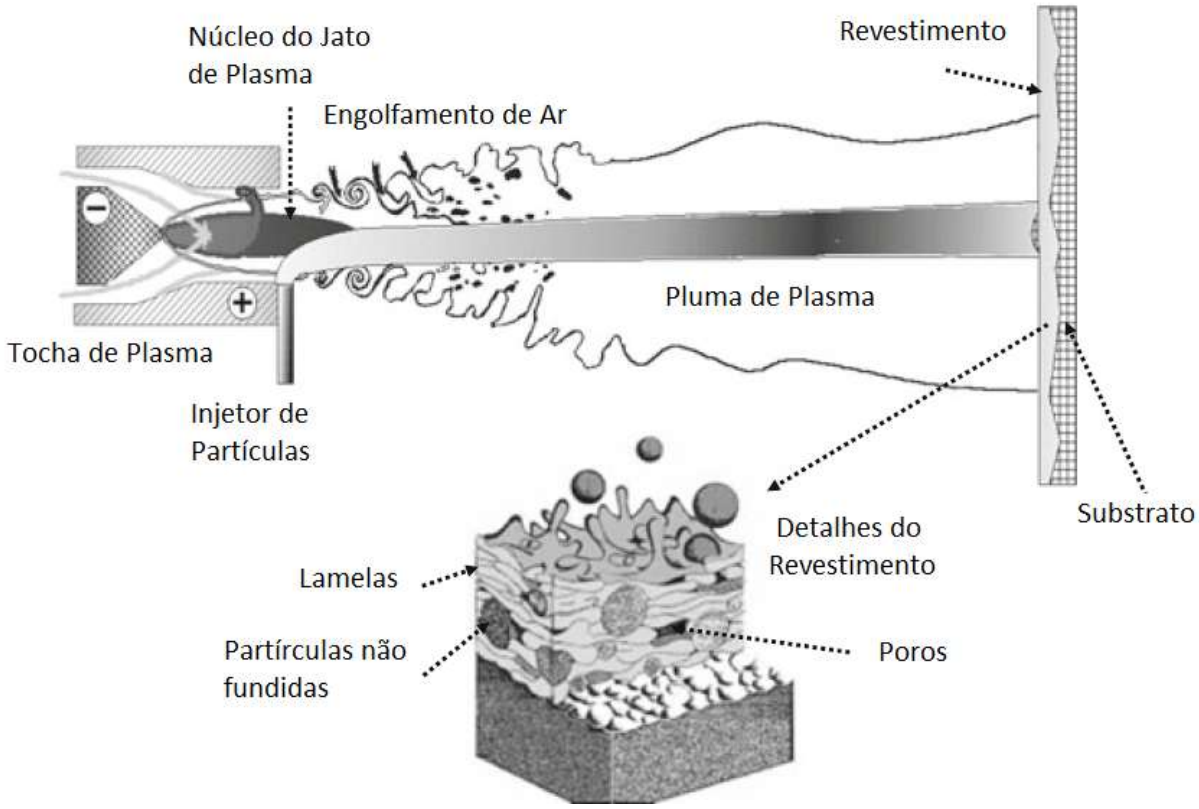


Figura 10: Esquema dos diferentes passos do processo de aspersão a plasma e esquema do revestimento aspergido (Adaptado de Fauchais *et al.*) [39].

1.6.2.1 - Processos e Técnicas de Aspersão Térmica

Os processos de aspersão térmica são comumente agrupados de acordo com o tipo de aquecimento: aquecimento por combustão ou aquecimento elétrico, com subgrupos colocados sob cada categoria (Figura 11). Esses processos usualmente empregam algum preaquecimento do substrato a ser revestido, contudo é basicamente um processo de energia cinética. A seleção dos processos típicos de aspersão térmica é usualmente determinada por [41]:

- Material de revestimento desejado;
- Requisitos de performance do revestimento;
- Economia;
- Tamanho da peça a ser revestida e portabilidade.

Os processos de aspersão podem ser classificados de acordo com a fonte de calor empregada. A Figura 11 apresenta alguns dos processos [42]:

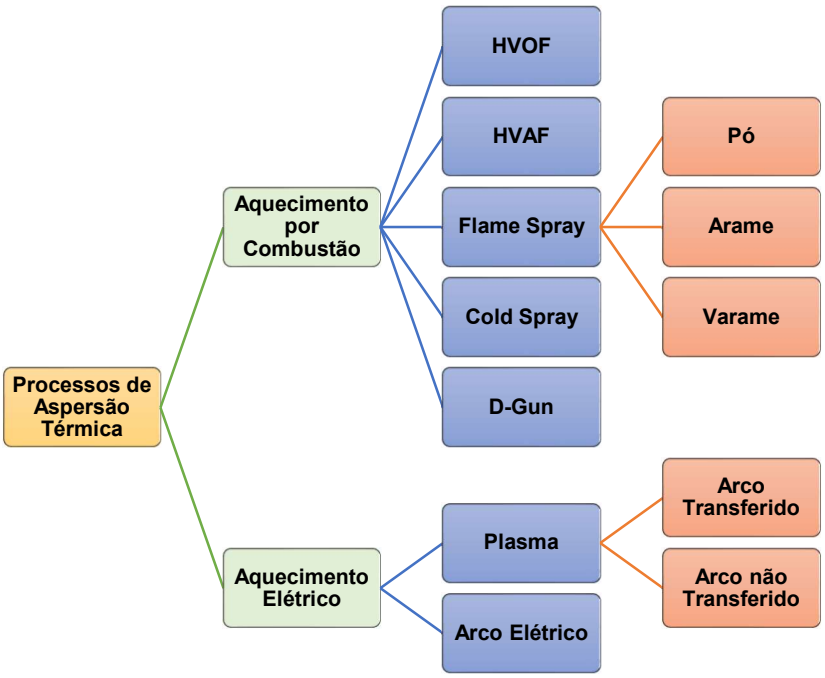


Figura 11: Processos de Aspersão Térmica de Acordo com a Fonte de Energia. Onde HVOF - Chama oxi-gás de alta velocidade, HVAF – Aspersão a ar-combustível de alta velocidade, *Flame Spray* - Chama Convencional ou Oxiacetilênica, *Cold Spray* - Aspersão fria, *D-Gun* – Aspersão por detonação. [42]

1.6.2.2 Aspersão Térmica por Arco Elétrico (AS)

Como a técnica para obter o revestimento testado neste trabalho foi a aspersão térmica (AT) por arco elétrico, apenas ela será abordada detalhadamente. Reconhecida como técnica particularmente eficiente, a aspersão por arco elétrico é empregada no aprimoramento das propriedades físicas, químicas e mecânicas das peças. Esse processo de aspersão, que utiliza arame como material de deposição, encontrou lugar em vários processos industriais para aumentar a resistência à corrosão, ao desgaste abrasivo e erosivo ou apenas endurecer a superfície de peças. Adicionalmente, ampliou o uso da aspersão térmica por arco elétrico em áreas anteriormente dominadas por outros processos como plasma, *cold spray* e HVOF. No processo de aspersão térmica por arco elétrico, um arco formado entre dois arames eletrodos funde as extremidades dos arames. Sob a ação de ar comprimido (ou algum gás inerte), a gotícula fundida é acelerada e projetada contra a superfície do substrato, previamente preparado. Cada gotícula projetada é achatada na superfície do substrato, resultando em uma camada de estrutura lamelar, contendo óxidos, poros e partículas não fundidas. As propriedades

dos depósitos dependem tanto das características intrínsecas do material utilizado como arame e da qualidade da camada, que por sua vez depende dos parâmetros do processo empregados [47].

O processo de aquecimento dos arames se dá por fonte elétrica, também denominado arco elétrico. Ele consiste em estabelecer uma diferença de potencial (D.D.P.) da ordem de 18 e 40V entre dois eletrodos arames consumíveis dispostos diante de um jato de gás, geralmente ar. Essa D.D.P. cria um arco elétrico na ponta dos eletrodos, causando a fusão dos mesmos [48]. O jato de gás atomizante em alta velocidade projeta gotículas do metal fundido contra o substrato [49]. As gotículas semi-fundidas se achatam ao impactarem sobre a superfície do substrato e se sobrepõem umas às outras formando camadas. Com a finalidade de reduzir a oxidação do material fundido durante a fabricação dos revestimentos, quando o substrato é um metal reativo como zircônio e titânio, são utilizados gases inertes como argônio, hélio ou até nitrogênio [49]. O processo tem boa eficiência energética, pois quase toda a energia fornecida funde o metal [50].

Os arames, materiais a serem aspergidos, carregados eletricamente com cargas opostas (um arame é positivo - anodo, o outro negativo - catodo) são alimentados conjuntamente e um arco controlado é gerado quando há interseção dos arames, ocorrendo o aquecimento e a fusão do metal (Figura 12). Um fator limitante para esta técnica é o fato de os materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores [49].

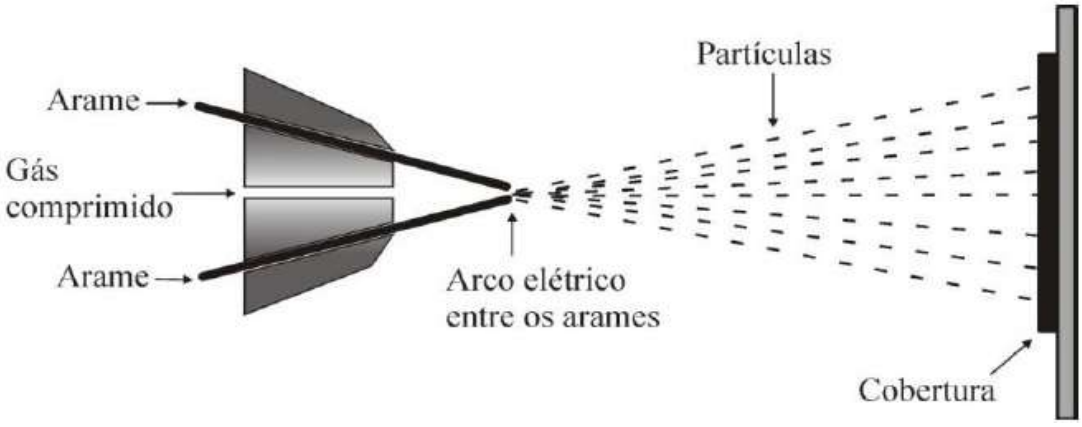


Figura 12: Esquema da tocha de aspersão por arco elétrico [48].

A temperatura do arco é consideravelmente maior que o ponto de fusão do material aspergido, de modo que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir, zonas de interação metalúrgica (reação química) ou zonas de difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. Estas interações são similares a

pequenas soldas a ponto e conferem excelente resistência de adesão e coesão ao revestimento [49].

As temperaturas do substrato podem ser muito baixas, pois nenhum jato de gás é dirigido diretamente ao substrato. Conforme já dito, a aspersão por arco elétrico pode ser executada com o uso de gás inerte ou em uma câmara de atmosfera controlada [48].

Um efeito negativo do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência a mudar a composição das ligas aplicadas devido à oxidação seletiva ou vaporização, ou mesmo à ocorrência simultânea destes dois fenômenos. A natureza destes efeitos é bastante complexa, mas pode ser minimizada pela criteriosa seleção da composição do arame [45].

As características microestruturais do material pulverizado em forma de arame são dependentes da concepção do bocal de ar, pressão do ar e das configurações de energia. Normalmente, pressão de atomização de ar baixa resulta em revestimentos mais ásperos, enquanto a alta pressão produz textura de superfície mais lisa. Os óxidos podem ser reduzidos aumentando-se as taxas de alimentação e substituindo o ar por gases inertes. Normalmente, a taxa de alimentação mais alta é uma função da amperagem [48].

1.6.2.3 - Preparação da Superfície

O comportamento e durabilidade de qualquer revestimento são significativamente afetados pela preparação de superfície a ser revestida. No caso de substratos de aço esta situação é ainda mais importante, uma vez que a seleção do método de preparação de superfície assume importância muito relevante em qualquer tratamento anticorrosivo. A preparação da superfície do substrato também auxilia na eliminação de ferrugem, contaminantes como sais, pós, óleos e gorduras que afetam o comportamento do revestimento [51]. As superfícies a serem revestidas são preparadas de acordo com a norma ISO 8501 [51].

1.6.2.4 - Propriedades dos Revestimentos obtidos por Aspersão Térmica

As características e propriedades dos revestimentos estão diretamente ligadas às energias térmicas e cinéticas envolvidas no processo. Busca-se, com a escolha adequada de parâmetros de aspersão, uma boa aderência ao substrato, juntamente

com propriedades inerentes à área de aplicação do revestimento, como elevada dureza e resistência ao desgaste, isolamento térmico/elétrico ou boa condutibilidade, resistência à corrosão e baixa oxidação [52].

As inclusões de óxidos aumentam a dureza do revestimento e isto pode torná-los frágeis. 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. Desta forma, inclusões de porcentagem elevadas de óxidos são normalmente consideradas prejudiciais às propriedades dos revestimentos, pois diminuem a adesão/coesão e aumentam a porosidade do mesmo. Por outro lado, em algumas aplicações, inclusões de óxidos são desejadas, particularmente quando bem distribuídas pelo revestimento, pois podem aumentar a resistência aos mecanismos de desgaste e corrosão [53].

Em geral, os metais aspergidos são mais duros que os metais que os originaram. Isto ocorre devido, principalmente, às inclusões de óxidos formadas durante o processo de aspersão quando oxigênio é utilizado como gás atomizante. Redes de óxidos dispersas no revestimento irão torná-lo menos dúcteis. Desta forma, pode-se afirmar que as propriedades físicas e o comportamento mecânico de um depósito aspergido dependem da aderência entre as lamelas e o substrato, da resistência coesiva entre as lamelas, do tamanho e morfologia dos poros, da presença de trincas e da microestrutura das lamelas [46].

1.6.2.5 - Aderência

A aderência de um revestimento é resultante da combinação de três mecanismos fundamentais relacionados à natureza das forças atuantes: mecânico, químico - metalúrgico e físico. Quando do impacto das partículas contra o substrato, essas se achatam numa forma lenticular, resfriam-se e ancoram-se mecanicamente na superfície rugosa. Por outro lado, em função da natureza do material, - se metálico ou cerâmico - e do calor transferido para o substrato, pode ocorrer micro-soldagem, podendo haver fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e inclusive compostos intermetálicos, caracterizando o mecanismo químico - metalúrgico. O terceiro mecanismo, considerado secundário, é de natureza física, quando ligações fracas do tipo Van der Waals contribuem para a aderência [54].

A aderência do revestimento, no processo de aspersão por arco elétrico, é alta, sendo de 3 a 4 vezes superior à aderência dos processos à chama, considerando a deposição da mesma liga sobre o mesmo material de base. As taxas de deposição são

também mais altas, comparando com outros processos, devido à corrente, a velocidade do arame e principalmente à utilização de dois arames enquanto que na técnica à chama convencional utiliza somente um, tornando assim bastante econômico a aplicação de revestimento em grandes superfícies. Valores da ordem de 13,5 kg/h comparados com 1,8-9 kg/h para a combustão com pó e 5,4 kg/h para a combustão com arame [54]. Alguns fabricantes de pistolas a arco elétrico reportam valores de até 52,9 kg/h para a aspersão do zinco [55]. Pode-se ainda aumentar a velocidade de atomização das partículas, produzindo uma camada depositada mais compacta e densa, diminuindo assim a porosidade.

1.6.2.5.1 - Fatores que influenciam a aderência

Alguns fatores que influenciam a aderência do recobrimento são limpeza e rugosidade superficial do substrato, as propriedades físico-químicas do material de aporte e a velocidade de impacto, das partículas fundidas que ao serem projetadas permitem, devido à sua alta energia cinética, a formação de uma área de contato maior da lamela de revestimento com a superfície do substrato [54].

1.6.2.6 - Tensões Residuais

Revestimentos aplicados por aspersão térmica apresentam, assim como outros tipos de revestimentos, tensões residuais que são originadas por dois mecanismos.

O primeiro mecanismo de geração de tensões internas ocorre devido ao resfriamento (resfriamento primário) das partículas aspergidas a partir da temperatura atingida no processo, que pode ser a temperatura de fusão ou outra temperatura menor, até a temperatura em que se encontra o substrato. Este tipo de tensão residual é denominado de tensão intrínseca (*intrinsic*), tensão de deposição (*deposition*) ou tensão de têmpera (*quenching*).

As tensões intrínsecas geradas no resfriamento primário surgem devido à restrição do movimento quando da contração das lamelas na solidificação. A restrição ao movimento é devido às outras lamelas anteriormente depositadas ou ao substrato. O somatório dessas micro-tensões pode mudar a distribuição de tensões no conjugado revestimento/substrato [56], [57].

O módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica do material aspergido e a diferença de temperatura entre o substrato e o revestimento influenciam os valores das tensões intrínsecas [58].

O segundo mecanismo ocorre devido aos diferentes níveis de contração entre o material do revestimento e do substrato quando o conjugado se resfria da temperatura atingida no final da deposição até a temperatura ambiente. Além disso, esse resfriamento secundário pode ocorrer de forma desigual em pontos diferentes do conjugado. Este mecanismo é denominado contração térmica diferencial e é dependente dos coeficientes de expansão térmica do substrato e revestimento e das temperaturas de fusão das partículas e do substrato. Essa contração gera diferentes níveis de tensão no revestimento e no substrato [58].

As tensões térmicas geradas no resfriamento primário e secundário são as responsáveis pela ocorrência de trincas e destacamento dos revestimentos. A maneira como essas tensões estão atuando no revestimento tem maior ou menor influência no destacamento dos revestimentos. As tensões geradas no resfriamento primário são sempre tensões de tração e as tensões geradas no resfriamento secundário dependem da relação entre os coeficientes de dilatação térmica do revestimento e do substrato. Se o coeficiente de dilatação térmica do revestimento é maior que o coeficiente de dilatação térmica do substrato, as tensões geradas no resfriamento secundário são de natureza trativa, caso contrário de natureza compressiva. Quando os dois coeficientes são iguais, ou seja, mesmo material, não há tensões resultantes. O somatório dessas tensões é que indicará qual o tipo de tensão resultante será atuante no revestimento [57], [58].

1.6.2.7 - Porosidade

A porosidade dos revestimentos tem uma grande importância quando se trata de resistência à corrosão, pois a proteção do substrato contra o meio agressivo depende, em parte, dela [59].

Como os revestimentos obtidos por aspersão térmica são formados por superposição de partículas achatadas, eles apresentam porosidade. Esta porosidade consiste tanto em cavidades isoladas, como em cavidades interconectadas capazes de permitir que líquidos e até gases penetrem até o substrato, tal fato constitui um grave problema, pois a penetração de espécies agressivas irá acelerar o processo de degradação do substrato [46].

Os revestimentos aspergidos termicamente podem apresentar variados graus de porosidade, dependendo do processo de aspersão, velocidade e tamanho das partículas aspergidas [41].

A porosidade intrínseca dos revestimentos pode facilitar acesso de agentes corrosivos ao substrato, resultando no princípio da corrosão e delaminação do próprio revestimento. A estrutura porosa não apenas deteriora a resistência à corrosão, como reduz as propriedades mecânicas do recobrimento, consequentemente reduzindo a sua resistência ao desgaste [60]. A porosidade que expõe o substrato é conhecida como permeabilidade.

A formação e desenvolvimento da porosidade em revestimentos são governados por um conjunto de parâmetros de aspersão. Apesar de ser possível aplicar um conjunto de parâmetros otimizados, com o intuito de obter revestimentos com uma concentração mínima de defeitos, a porosidade ainda ocorre [26]. Normalmente, depósitos obtidos com pós metálicos são mais porosos, devido ao grande número de partículas sólidas incorporadas, isto ocorre, por exemplo, quando algumas partículas metálicas não sofrem fusão na pistola ou sofrem solidificação durante o trajeto do bico da pistola até o substrato previamente preparado [41]. A Figura 13 apresenta uma classificação didática dos tipos de porosidade que um revestimento aspergido termicamente pode apresentar.

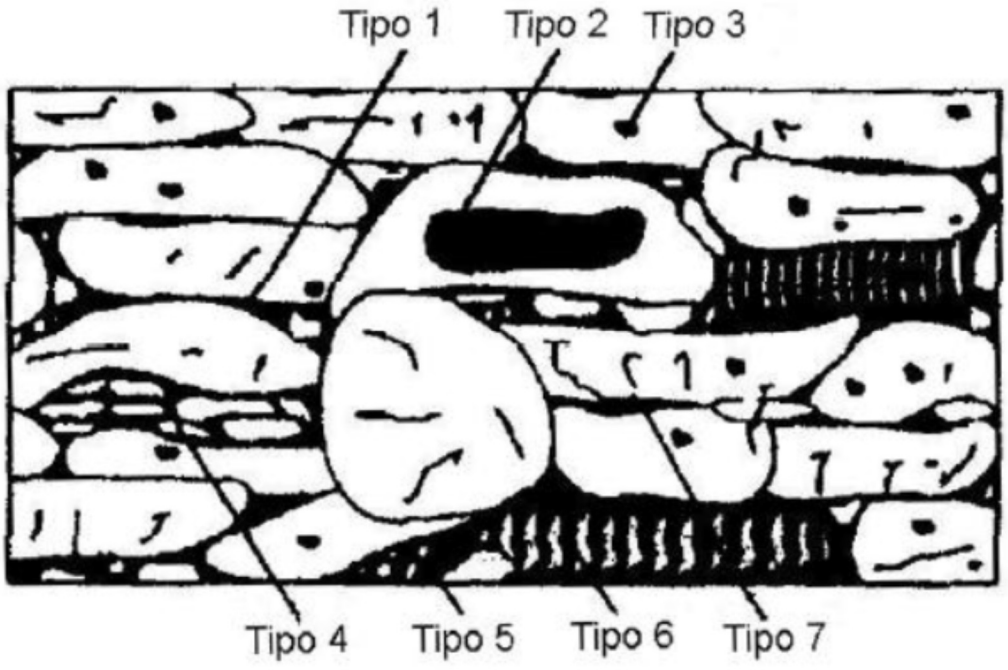


Figura 13: Tipos de porosidade em um revestimento aspergido termicamente [46]; [59].

- Tipo 1: porosidade formada entre as lamelas e causada pelo empilhamento de partículas separadas. Este tipo de porosidade pode estar relacionado ao tamanho da partícula aspergida e a característica do material de alimentação.
- Tipo 2: porosidade formada por bolsas de gás presas, causadas pela turbulência do fluxo de gás durante o processo de aspersão.
- Tipo 3: porosidade manifestada na forma de bolhas de gás causada pela dissolução do gás no metal fundido que se desenvolveram com o resfriamento do metal.
- Tipo 4: porosidade causada pela desintegração de partículas sólidas após o impacto, durante o processo de deposição.
- Tipo 5: porosidade ocasionada pela condensação de partículas parcialmente evaporadas e que foram identificadas como partículas contendo resíduos de pó.
- Tipo 6: porosidade resultante de contração de solidificação.
- Tipo 7: porosidade que resulta em microtrincas, independente de sua origem de formação.

A porosidade pode auxiliar no comportamento tribológico do revestimento devido à retenção do filme de lubrificante. A porosidade também é benéfica em revestimentos de implantes biomédicos, pois as camadas lamelares de óxidos podem acarretar baixo desgaste e atrito dado à lubricidade de alguns óxidos [41].

A porosidade em revestimentos aspergidos termicamente é dependente do processo de aspersão selecionado e comumente apresentam aproximadamente de 5 - 15% de poros em sua microestrutura. A retenção de partículas não fundidas ou novamente solidificadas pode levar a baixas forças de coesão do depósito, especialmente no caso de materiais já revestidos sem nenhuma pós-deposição ou tratamento térmico [41].

O ângulo de aspersão é um dos fatores que influenciam na porosidade [46]. A porosidade do revestimento tende a diminuir quando o ângulo de aspersão se aproxima de 90º. Sendo 45º o ângulo de impacto mínimo aceitável, pois a partir deste valor propriedades como força de ligação e coesão do revestimento ficarão comprometidas.

Outro fator que influencia a porosidade dos revestimentos é a presença de partículas sólidas ou não fundidas. Assim, dependendo da temperatura das partículas,

as gotículas que se chocam com o substrato / revestimento podem se encontrar desde o estado fundido até o estado sólido. As partículas no estado líquido escoam facilmente e fecham a maior parte dos vazios. Por outro lado, as partículas sólidas aderem superficialmente na rugosidade do depósito dificultando o contato entre as partículas posteriores, acarretando assim vazios/ porosidades no revestimento [60] [61].

Apesar de na maioria das vezes as porosidades causarem diminuição da aderência entre o revestimento e o substrato e diminuição da resistência à corrosão, a existência de poros num revestimento pode não ser prejudicial. Pelo contrário, existem casos em que a porosidade é desejada, por exemplo, em revestimentos usados como barreira térmica (TBC - *Thermal Barrier Coatings*) que são geralmente compostos por óxidos cerâmicos, onde a inclusão de 8 a 15 % de porosidade aumenta ainda mais suas capacidades isolantes. A porosidade também aumenta a resistência a choques térmicos e ciclos de temperatura [61].

1.6.2.8 - Taxas de Erosão

O desempenho revestimentos submetidos ao desgaste abrasivo ou erosivo depende de particularidades estruturais, como dissimilaridade da estrutura do compósito, fração volumétrica de poros e estado de tensão da superfície. A performance do revestimento também depende de propriedades mecânicas, como dureza e tenacidade. Em condições de laboratório, dureza, forma, e tamanho do abrasivo, velocidade da partícula abrasiva e ângulo de impacto, e outras condições experimentais, como temperatura, também devem ser levadas em consideração [62] [63].

Hoop [36], em seu estudo com dez tipos de revestimentos, demonstrou que taxas de erosão tendem a ser maiores inicialmente e decrescem em função do aumento da massa de material erodido até o estado uniforme. As altas taxas iniciais de erosão encontram explicação no fato de que irregularidades superficiais são removidas pelo impacto das partículas. Os revestimentos aspergidos termicamente podem apresentar superfícies extremamente rugosas, dependendo dos parâmetros de processo adotados. Grandes projeções superficiais são mais fáceis de serem arrancadas por erosão em comparação a materiais com superfícies suaves. Consequentemente, a rugosidade superficial é continuamente reduzida com o aumento da erosão, até que seja alcançado um valor aproximadamente constante, dependente de fatores como características da partícula e propriedades do material de base. Quando esse estado da superfície é

alcançado, as condições para o estado uniforme do desgaste erosivo são estabelecidas [36].

Um padrão pode ser verificado entre o aumento da dureza dos revestimentos e a redução na taxa de erosão, permitindo o entendimento que a dureza por si só, não é um bom guia para a resistência à erosão de um determinado revestimento, dado que a resistência à erosão de um revestimento depende de como a dureza e a estrutura interagem com a composição das fases, microfissuras, além das condições de impingimento das partículas solidas. Head *et al.* [63] mostrou que em baixos ângulos de incidência, a resistência à erosão é proporcional à dureza do material. Em impactos perpendiculares, a resistência à erosão é proporcional ao trabalho de deformação, ou seja, à área sob a curva de um gráfico tensão x deformação.

As falhas em revestimentos dependem da influência de vários parâmetros dos materiais como dureza, módulo de elasticidade do revestimento e do substrato, espessura do revestimento e tensões residuais [64].

A resistência ao desgaste de sistemas revestimento-substrato depende intensamente de um substrato que ofereça suporte, limitando a deformação e prevenindo a fratura do revestimento. Na aplicação de um revestimento é necessário levar em consideração dois critérios importantes: (i) a dureza da região revestida e (ii) o grau de adesão entre substrato e revestimento [64] [65].

A interação partícula-partícula, pode ser um fator de redução da taxa de erosão, pois uma vez que a taxa de erosão depende tanto do mecanismo de erosão quanto da transferência de energia cinética entre as partículas que atingem e as partículas ricocheteadas da superfície, tal interação pode formar uma camada de escudo sobre a superfície da amostra, protegendo a área pela redução do impacto das partículas incidentes. Esse efeito de escudo é fortemente influenciado por ângulo de incidência, taxa de fluxo de massa do abrasivo e velocidade do jato [66] [67].

1.6.2.8.1 Efeito da Microestrutura

A diferença nos comportamentos contra o desgaste erosivo dos revestimentos encontra-se na microestrutura e na forma como o material é arrancado durante a erosão. As microestruturas desses revestimentos variam e não são consistentes devido ao método de aplicação o qual as partículas fundidas ou semi-fundidas são jateadas contra a superfície “fria” do substrato.

Os impactos das partículas sobre uma superfície polida mostram as mesmas características associadas ao processo de erosão dúctil que consiste na deformação da superfície e arrancamento, além da aparência de protrusões ou lábios de cisalhamento. A perda de material ocorre durante a ação de corte do abrasivo produzindo fragmentos e a perda total de projeções com alta concentração de tensões pela ação das partículas sólidas [36], conforme Figura 14.

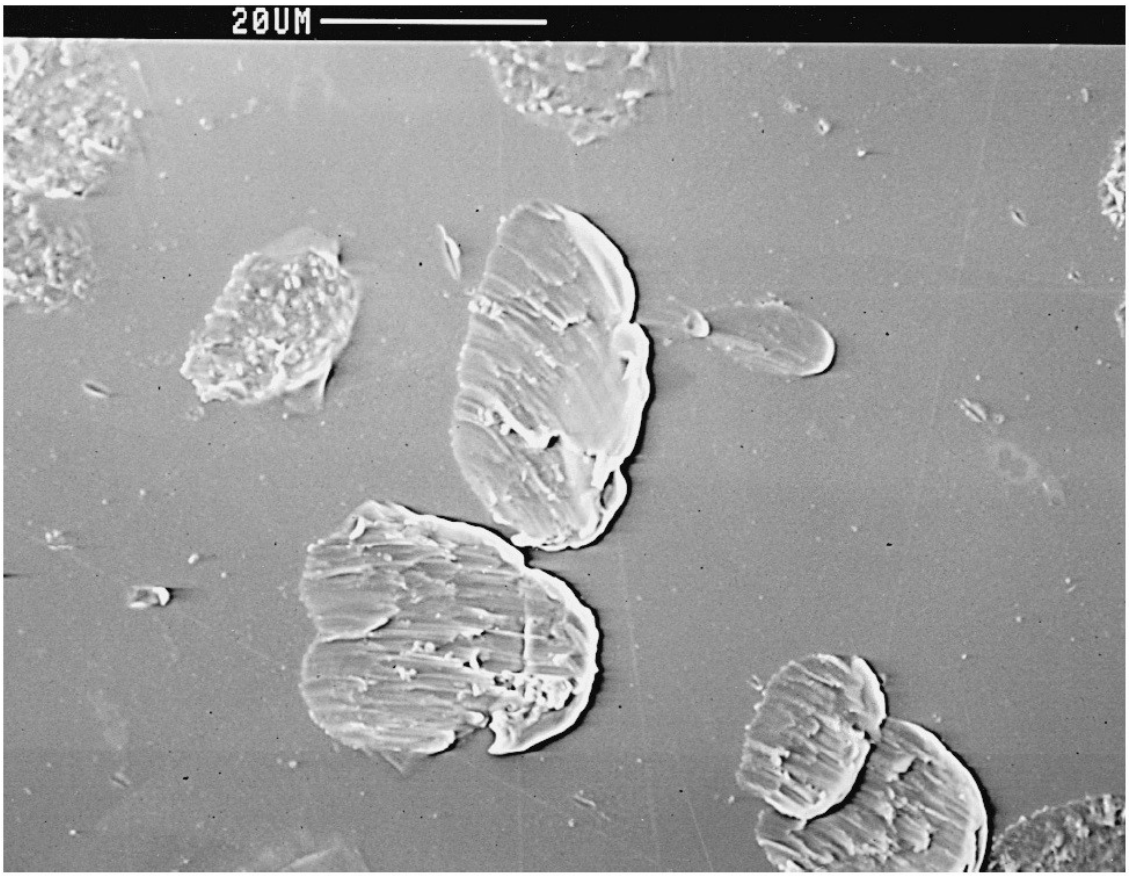


Figura 14: Micrografia mostrando o resultado do impacto de partícula sólida em uma superfície polida [36].

Regiões com concentradores de tensões somadas às propriedades dos revestimentos, tais como fases de óxidos e porosidades, podem permitir o aparecimento de fissuras. Tais lascamentos culminam em perdas maiores de massas de material que uma simples erosão dúctil, levando a uma alta taxa de erosão [36]. Este aspecto pode ser observado na Figura 15.

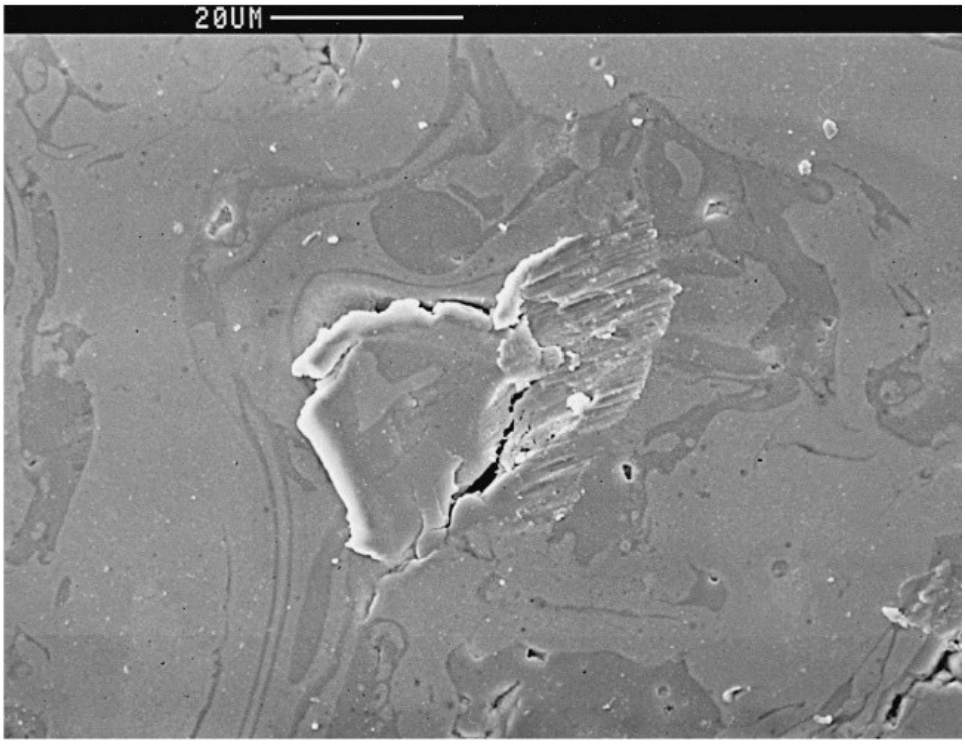


Figura 15: Micrografia do impacto de partícula sólida sobre superfície polida [36].

A remoção de material de revestimentos com a presença de carbetos homogeneamente distribuídos mostraram que a deformação é muito menor que a de um aço dúctil. Isso pode parecer que impactos repetitivos eventualmente levam a um trabalho de endurecimento e fissuração superficial e finalmente perda de material [36], como visto na Figura 16.

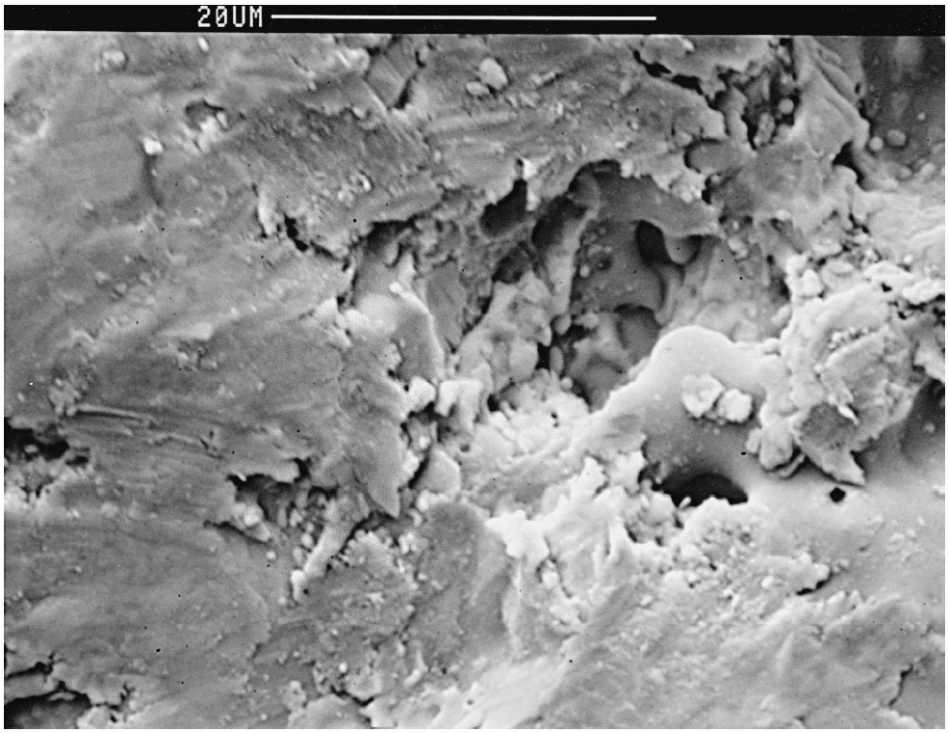


Figura 16: Micrografia mostrando o impacto de partícula sólida sobre a superfície de um revestimento com carbetos finos e homogeneamente distribuídos [36].

1.6.2.8.2 - Influência da Porosidade na Taxa de Erosão

Poros existem em muitos materiais e são gerados durante os processos de fabricação, como por exemplo em fundição ou sinterização de metais, cerâmicos ou compósitos. A presença de porosidades geralmente resulta em influências deletérias ao comportamento dos materiais, podendo causar a redução do módulo de elasticidade, a redução da resistência e da ductilidade de materiais, além de influenciar negativamente nas suas condutividade e propriedades magnéticas [67].

A influência da porosidade no comportamento ao desgaste de um material depende de sua microestrutura e das condições de desgaste às quais está submetido. A presença de poros pode ser muito deletéria à resistência ao desgaste de um compósito, pois quando uma força é aplicada sobre o material, os poros podem se comportar como concentradores de tensões, facilitando a geração de trincas, que podem facilmente se propagar por cavidades interligadas com alta concentração de tensões, levando à eventual falha da superfície do compósito, ou seja, há correlação entre o aumento da taxa de erosão e o aumento da porosidade. Os efeitos negativos da

porosidade na resistência ao desgaste são influenciados pelo tamanho, formato e fração volumétrica dos poros [67], [68], [69].

A medida de porosidade é propensa a uma grande dispersão devido ao método de aplicação do revestimento, que pode gerar grande variação ao longo da microestrutura [36].

1.6.2.8.3 Influência do Fluxo de Partículas

A erosão de uma superfície por partículas abrasivas em um fluido inerte depende do número de partículas impactantes, a velocidade e a direção das partículas em relação à superfície. Essas quantidades são vastamente determinadas pelas condições do fluxo e suas variações podem elevar ou reduzir as taxas de erosão. Em sistemas onde a direção do fluxo muda rapidamente a erosão é consideravelmente mais severa que em um tubo com fluxo unidirecional. Turbulência localizada, devido a um desalinhamento de peças pode elevar fortemente. Por isso, geralmente, os problemas de erosão se intensificam durante o tempo de vida de uma unidade que trabalha sob condições erosivas. Em bombas ou outros equipamentos que trabalham com fluxos, a erosão localizada pode ser creditada a fluxos secundários [70] [71].

A velocidade e direção da partícula abrasiva no fluido não é necessariamente a mesma daquelas do fluido. Por essa razão, a influência da velocidade, do tamanho e da geometria de partícula na erosão não é ainda totalmente claro. Usualmente, a perda de massa é expressa como uma função da pressão ou da velocidade do fluido e a relação dessas propriedades com a velocidade das partículas depende do tamanho e morfologia das partículas, bem como as condições particulares de fluxo no experimento [70] [71].

1.6.2.8.4 - Influência do Acabamento Superficial Inicial no Desgaste Erosivo

Diversos fatores influenciam a taxa de desgaste erosivo, como o regime de fluxo e as propriedades das fases sólida e líquida da suspensão. As condições de fluxo, juntamente com as características do material alvo ou da camada de corrosão que o reveste, bem como as propriedades do fluido e das partículas, afetam a dinâmica de impacto das interações entre as partículas abrasivas e a superfície do componente, influenciando, assim, a taxa de erosão. Entre essas propriedades do material estão dureza, tenacidade à fratura, coeficiente de restituição, elasticidade e o grau de rugosidade da superfície [72].

O comportamento tribológico de diferentes materiais pode ser significativamente alterado pelo acabamento superficial inicial. As características da superfície, que variam

de distorções macroscópicas na estrutura até irregularidades microscópicas locais, exercem forte influência no atrito, desgaste, oxidação, cavitação e na eficácia da lubrificação [73].

Em revestimentos aplicados por aspersão térmica, o acabamento superficial influencia diretamente as taxas de erosão. Revestimentos aspergidos termicamente por arco elétrico geram um perfil de superfície extremamente rugoso quando comparados com outros métodos. Projeções grandes na superfície são removidas mais facilmente pela erosão do que o material de superfícies lisas. Consequentemente, o valor de rugosidade superficial R_a (rugosidade média) é continuamente reduzido com o aumento da erosão até atingir um valor aproximadamente constante, dependente de fatores como as características das partículas impactantes e as propriedades do material base. Quando esse estado superficial é alcançado, estabelecem-se condições de desgaste erosivo em regime estacionário [36].

Em um estudo da performance frente ao desgaste de revestimentos WC/Cr_3C_2 preparados com a técnica de aspersão térmica por plasma, em substrato de aço inoxidável 316, Maharajan *et al.* [74] conduziram ensaio de jateamento erosivo, impingindo alumina (Al_2O_3) a um ângulo de 90°. Após o jateamento, as taxas de erosão dos revestimentos testados, sendo eles WC (R_a = 5,78 µm), Cr_3C_2 (R_a = 4,65 µm), WC+Cr_3C_2 (R_a = 5,79 µm), foi comparada à taxa de erosão do substrato (R_a = 0,440 µm). O desgaste erosivo do material sem revestimento é inicialmente menor devido à sua natureza altamente dúctil e à rugosidade superficial mínima. As partículas erosivas são removidas no início do ataque sem causar perda significativa de material. Assim, a taxa de desgaste erosivo do material sem revestimento é menor durante os primeiros 15 a 20 minutos de exposição ao agente erosivo. Por outro lado, a taxa de desgaste erosivo do material revestido é inicialmente alta devido à alta rugosidade superficial do revestimento, caracterizada por pequenos aglomerados, asperezas e poros na superfície. Especificamente, durante o ataque inicial do agente erosivo, a camada superior do revestimento é removida com menor energia. Os picos quebrados e as texturas variadas na superfície do material revestido atuam como uma terceira partícula, aumentando a abrasão. Com o aumento do tempo de exposição ao agente erosivo, a taxa de desgaste erosivo do material sem revestimento aumenta. Além disso, a formação de trincas severas e sua propagação são causadas pelo ataque repetitivo das partículas erosivas na superfície do material sem revestimento. Partículas erosivas de alta velocidade atingem repetidamente a superfície durante 20 a 30 minutos, provocando uma perda de massa significativa devido a um intenso micro desgaste na

superfície do material não revestido. Como resultado, a taxa de desgaste aumenta com a maior duração da exposição ao agente erosivo.

1.6.2.8.5 -Influência do Acabamento Superficial Inicial na Resistência à Corrosão

A rugosidade superficial é considerada um parâmetro crucial que afeta a taxa de corrosão e a resistência à corrosão-desgaste (tribocorrosão) em qualquer ambiente corrosivo. A rugosidade superficial influencia a camada limite hidrodinâmica e de transferência de massa, o que pode alterar os comportamentos eletroquímicos e mecânico-químicos de uma superfície. Estudos sobre o efeito do acabamento superficial são importantes para prever a taxa de corrosão em condições de superfície de biomateriais no estado "como recebido" e em superfícies mais trabalhadas, como aquelas mais lisas [75]. A rugosidade superficial tem um impacto significativo tanto na corrosão generalizada quanto na nucleação de pites metastáveis e no potencial de corrosão localizada [76].

Abosrra *et al.* [77] estudaram o comportamento à corrosão do aço inoxidável austenítico 316L em soluções salinas contendo 1% e 3% de NaCl. Foram investigadas amostras com diferentes rugosidades superficiais, e a técnica de medição de polarização anódica foi utilizada. Os resultados experimentais revelaram que os íons cloreto têm um efeito significativo no comportamento à corrosão do aço inoxidável 316L. À medida que a rugosidade superficial inicial do aço inoxidável 316L aumentava, o potencial de ruptura (E_{break}), o potencial de corrosão livre (E_{corr}) e a largura da faixa de passividade diminuíam, resultando em um aumento da taxa de corrosão. O exame metalográfico de amostras corroídas após os testes de corrosão eletroquímica confirmou que a ruptura da região passiva foi causada por corrosão por pites [77]. A resistência à corrosão também foi drasticamente reduzida com o aumento da concentração de NaCl até 3%.

Suter *et al.* [78] investigaram o início da corrosão por pites em solução de NaCl 1 M em alumínio de alta pureza e ultra-alta pureza, utilizando uma microcélula eletroquímica para avaliar os parâmetros que induzem corrosão localizada. Os estudos mostraram que, em superfícies rugosas, áreas com alguns defeitos (pontos fracos) são mais ativadas do que em superfícies lisas. Além disso, os potenciais de pite medidos localmente em amostras polidas, que apresentavam superfícies mais lisas, foram deslocados para valores mais positivos em comparação com aqueles medidos em amostras lixadas com maior rugosidade.

2 Materiais e Métodos

2.1 .- Substrato

O substrato utilizado como base para a aplicação do revestimento foi obtido a partir de uma chapa de aço com 8 mm de espessura nominal. A escolha do material foi baseada na semelhança da sua composição química com aquela dos tubos comumente usados em caldeiras de centrais termelétricas e trocadores de calor, e que possuem classificação ASTM A178 (2012) [79]. A Tabela 1 apresenta a composição química do substrato, de acordo com informações do fornecedor. A Tabela 2 apresenta o Aço ASTM A178 [79] e suas similaridades com o aço empregado como substrato deste trabalho.

Tabela 1: Composição Química do Substrato (Fonte: Arcelor Mittal).

	Manganês	**Carbono**	**Cromo**	**Fósforo**	**Enxofre**	**Ferro**
% Peso	1,17	0,17	0,17	0,019	0,0027	Balanço

Tabela 2: Composição química do aço ASTM A178, Grade D, Aço-Carbono Manganês [79].

	Manganês	**Carbono**	**Fósforo**	**Enxofre**	**Silício**	**Ferro**
% Peso	1,00 – 1,50	0,27 máx	0,030	0,015	0,10 mín	Balanço

2.2 – Revestimento e Composição Química do Arame

A seleção de método para obtenção do revestimento por aspersão térmica manual foi baseada na possibilidade de revestir as tubulações das caldeiras afetadas pela erosão do impacto das cinzas em campo, isto é, na área de operação. Os parâmetros de processo para revestir a chapa de aço com um arame de composição química conforme Tabela 3 foram selecionados com base na expertise da empresa e de modo a se obter a menor porosidade possível para uma aspersão com menor custo relativo de aplicação.

Tabela 3: Composição Química do Arame Usado no Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico (Fonte: VGK Engenharia).

	Silício	**Cromo**	**Manganês**	**Boro**	**Ferro**
% Peso	1,6	29	1,65	3,75	Balanço

2.3 - Procedimento de Aspersão Térmica

O processo de aspersão térmica foi executado em um equipamento TAFA – 8835, empregando a pressão de aspersão de 60 PSI, corrente de 100 A e tensão entre 28 e 30V, com ar comprimido para propulsão das partículas contra o substrato.

A aspersão foi executada perpendicularmente com passes horizontais e verticais na superfície previamente preparada da chapa de aço (nível Sa $2_{1/2}$ de acordo com as Normas ISO 8501-1[51] e ISO 8504-2 [80]). Os parâmetros de aspersão empregados na preparação das amostras são apresentados na Tabela 4. A combinação de parâmetros utilizada para a obtenção do revestimento foi descrita como sendo aquela que geraria um tamanho de partícula considerado “ótimo”, pois partículas grandes promovem a maior formação de poros e partículas muito finas favorecem a oxidação [70].

Tabela 4: Parâmetros de Aspersão (Fonte: VGK Engenharia).

Taxa de Deposição	**3,64 Kg/h/100A**
Consumo de Arame	**1,2 Kg/m²/100 µm**
Posição Padrão de Aspersão	**76,2 mm (3”)**
Distância de Trabalho	**80 – 120 mm**
Espessura Final da Camada Aspergida	**8,68 – 8,78 mm**
Posição da Pistola	**90° ± 5**

A Figura 17 mostra o resultado do processo de aspersão do revestimento por AT sobre a chapa, antes do corte para a obtenção das 10 amostras utilizadas neste trabalho.



Figura 17: Chapa revestida após o processo de aspersão.

Foram obtidas 10 amostras, cortadas da chapa de aço revestida, com dimensões de aproximadamente 40 x 10 mm (Figura 18).

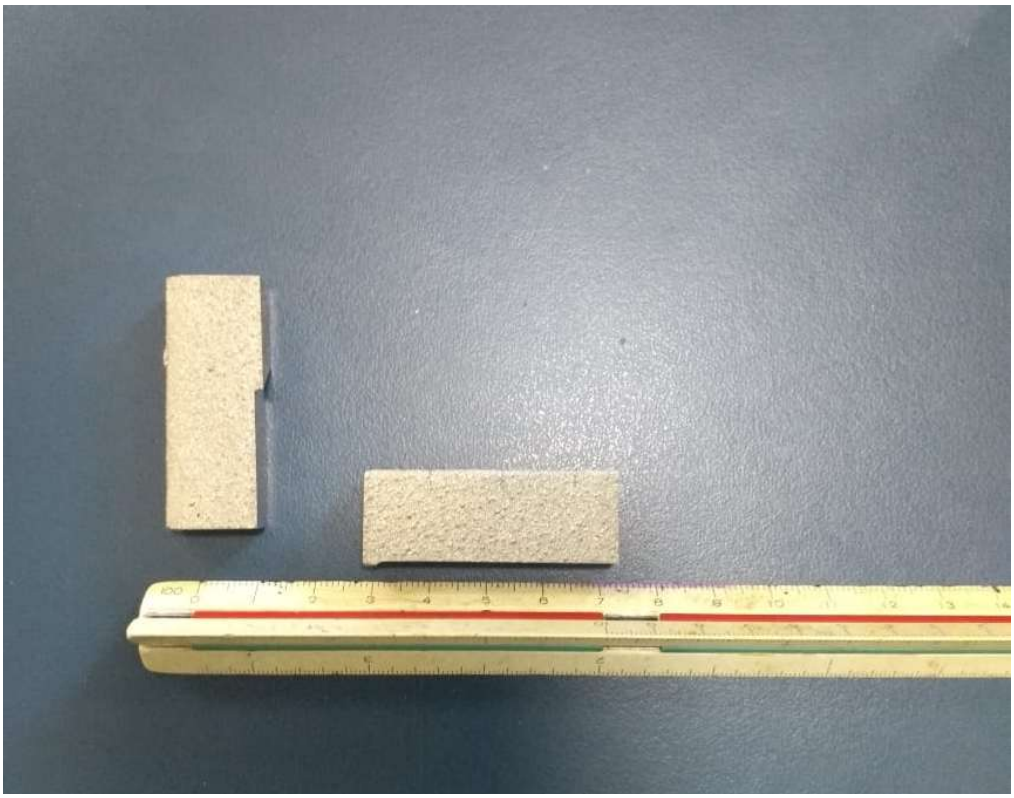


Figura 18: Amostras retiradas da chapa de aço e já revestidas por AT pelo arame da Liga Fe-Cr-B-Mn-Si. (Fonte: Próprio Autor).

2.4 – Usinagem do Revestimento por Retífica

O processo de retifica utilizado para a obtenção de 2 níveis distintos de acabamentos superficiais das peças em estudo. Devido à dureza elevada e à arquitetura dos revestimentos metálicos obtidos por AT, o acabamento por retifica demonstra-se como a melhor operação para alteração da superfície [81][82]. Durante o processo, o emprego de rebolos super abrasivos resulta em baixas cargas térmicas e, consequentemente, tensões residuais reduzidas [81][82].

O processo de usinagem foi executado na Máquina modelo TA-63, do fabricante FERDIMAT, pertencente ao Instituto Federal do Rio de Janeiro campus de Paracambi (IFRJ – Paracambi).

Os parâmetros da retifica foram: passes de desbaste de 0,10 mm, dois passes de acabamento de 0,05 mm; velocidade do rebolo 2225 rpm; operação com lubrificação / refrigeração.

As amostras retificadas foram identificadas conforme Figura 19: As amostras 1, 2 e 3 sofreram um acabamento fino, para obtenção de menor rugosidade superficial. As amostras 4, 5, 6 e 7, foram retificadas para gerarem um acabamento intermediário. E as amostras 8, 9 e 10 foram mantidas como aspergidas, isto é, sem acabamento.

Ademais, como as amostras possuíam alguma curvatura (empeno), houve um problema nos cupons que foram retificados para obter-se um acabamento intermediário. Esse acabamento intermediário só foi obtido no centro da amostra.

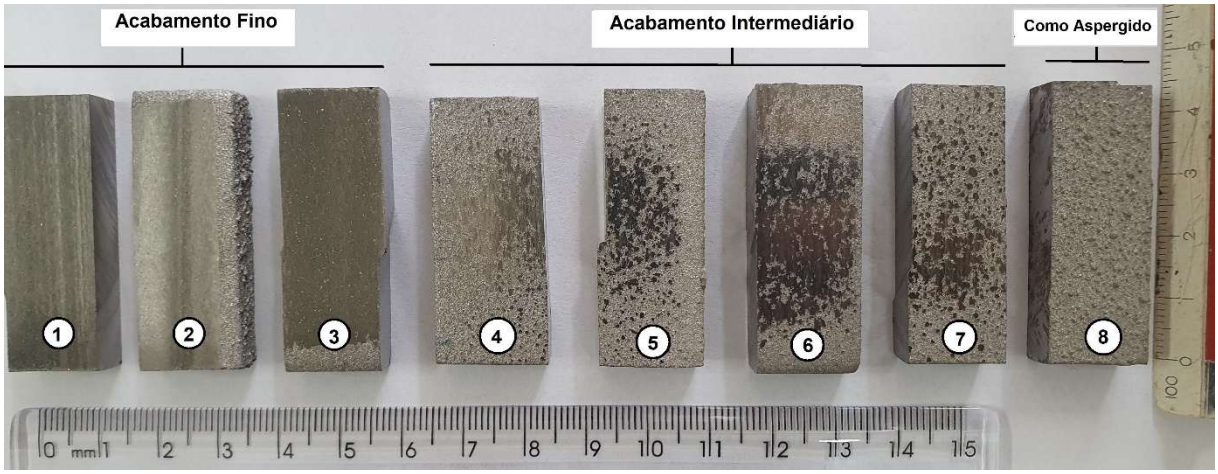


Figura 19: Amostras após acabamento de Retífica (Fonte: Próprio Autor).

2.5 - Medidas de Rugosidade Média (R_a)

O ensaio para medida da rugosidade média (R_a) das superfícies com diferentes graus de acabamento foi executado em Rugosímetro Mitutoyo, modelo SURFTEST SJ-210, pertencente ao Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). A Tabela 4 apresenta detalhes do equipamento utilizado. Os resultados de R_a foram medidos oito amostras de aço ASTM A178 [79], revestido por AT com a liga Fe-Cr-B-Mn-Si, sendo três amostras com acabamento fino, quatro amostras com acabamento intermediário e uma amostra com acabamento como recebido. As medidas foram feitas em 2 direções perpendiculares entre si, com o intuito de verificar a presença de anisotropia (Figura 20) e foram obtidas três medidas por direção preferencial em cada amostra.

Tabela 5: Informações Técnicas do Rugosímetro.

Curso total eixo X	16,0mm
Curso Total/Sensor/Curso	360 µm (-200 µm até +160 µm)
Curso Total/Sensor/Resolução	360 µm / 0,02 µm, 100 µm / 0,006 µm, 25 µm / 0,002 µm
Velocidade de medição	Durante a medição: 0,25mm/s, 0,5mm/s, 0,75mm/s Retorno: 1mm/s
Força de medição	4mN/90º, 5µmR (quando o código termina com "-02")
Força de apoio	400mN ou menos
Valores de cutoff λc	0,08, 0,25, 0,8, 2,5 mm
Valores de cutoff λ s*5	2,5, 8 µm
Comprimento de amostragem	0,08, 0,25, 0,8, 2,5 mm

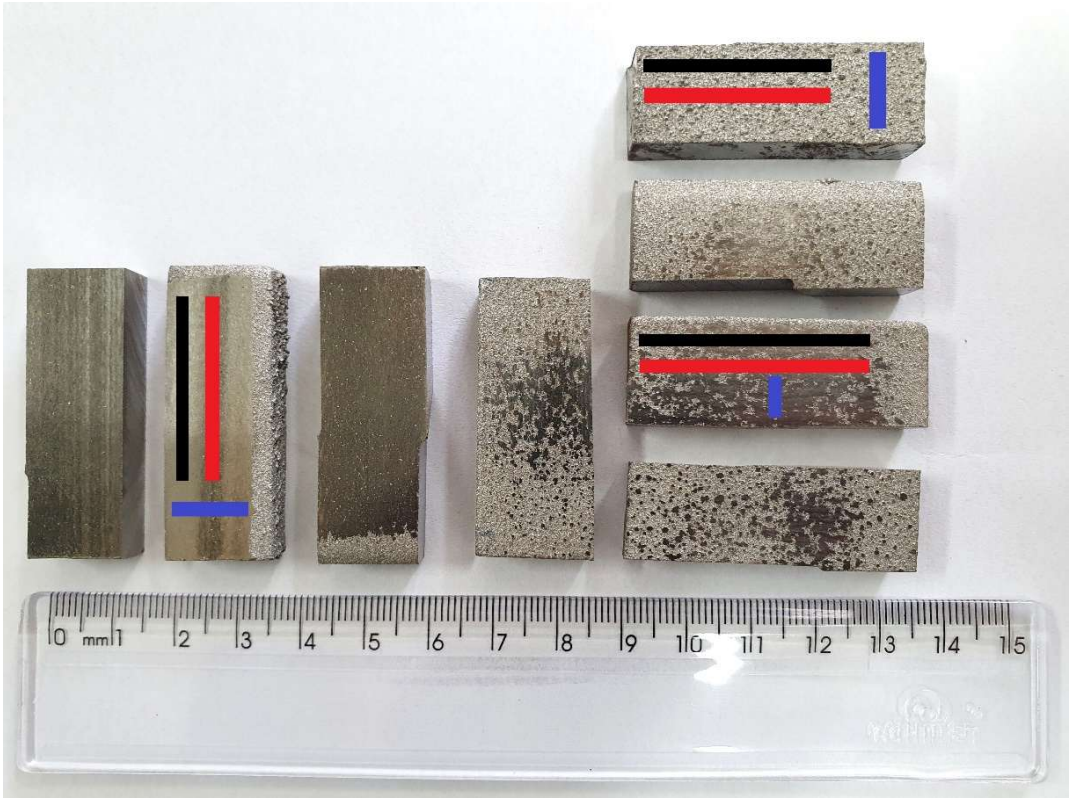


Figura 20: Direções preferenciais para a medição de rugosidade. A linha preta indica a direção do processo de retifica. A linha vermelha indica a medição paralela e a linha azul indica a medição perpendicular. A amostra com acabamento conforme obtido pela AT também foi avaliada.

2.6 - Ensaio de Jateamento Erosivo

O ensaio de desgaste por jateamento abrasivo tomou como base o Método de Teste Padrão para a Condução de Testes de Erosão por Impacto de Partículas Sólidas Usando Jatos de Gás da norma ASTM G76 (2005) [83]. O objetivo foi empregar um método de avaliação da perda de material, simulando o que ocorre nas paredes dos tubos das caldeiras em decorrência do impacto das cinzas volantes do carvão mineral ao longo do tempo, analisando o comportamento de superfícies de revestimento com diferentes níveis de acabamento ao impacto das partículas abrasivas.

2.6.1 Calibração do Equipamento

Para o início dos testes de jateamento abrasivo em laboratório foram feitos ensaios em corpos de prova de aço SAE-1020, de material idêntico ao usado para obtenção das taxas de erosão descritas na norma ASTM G76 (2005) [83], que foi referência para a padronização dos resultados. O fluxo e a velocidade das partículas

abrasivas foram ajustados no equipamento de jato com uso de partículas de 110 µm de óxido de alumínio angular projetadas a 90°, o ângulo selecionado é aquele capaz de promover o maior desgaste no ensaio de jateamento. Foi empregado o óxido de alumínio angular da marca Defama.

Apesar de o jateamento abrasivo ter tomado como referência a norma ASTM G76 (2004) [83], o processo foi alterado em granulometria e morfologia do abrasivo. A escolha do material abrasivo foi baseada na busca por um agente abrasivo que apresentasse características semelhantes às da cinza do carvão mineral (particularmente na dureza e no tamanho médio da partícula), entretanto com geometria e faixa granulométrica mais controlada e que pudesse ser utilizado na máquina de jateamento, optou-se então, pela alumina angular com granulometria de 110 µm.

O processo foi executado em uma cabine de jateamento da marca Essence, modelo Precision 1, com aberturas para manipulação das amostras e dispositivos, como pode ser observado na Figura 21.

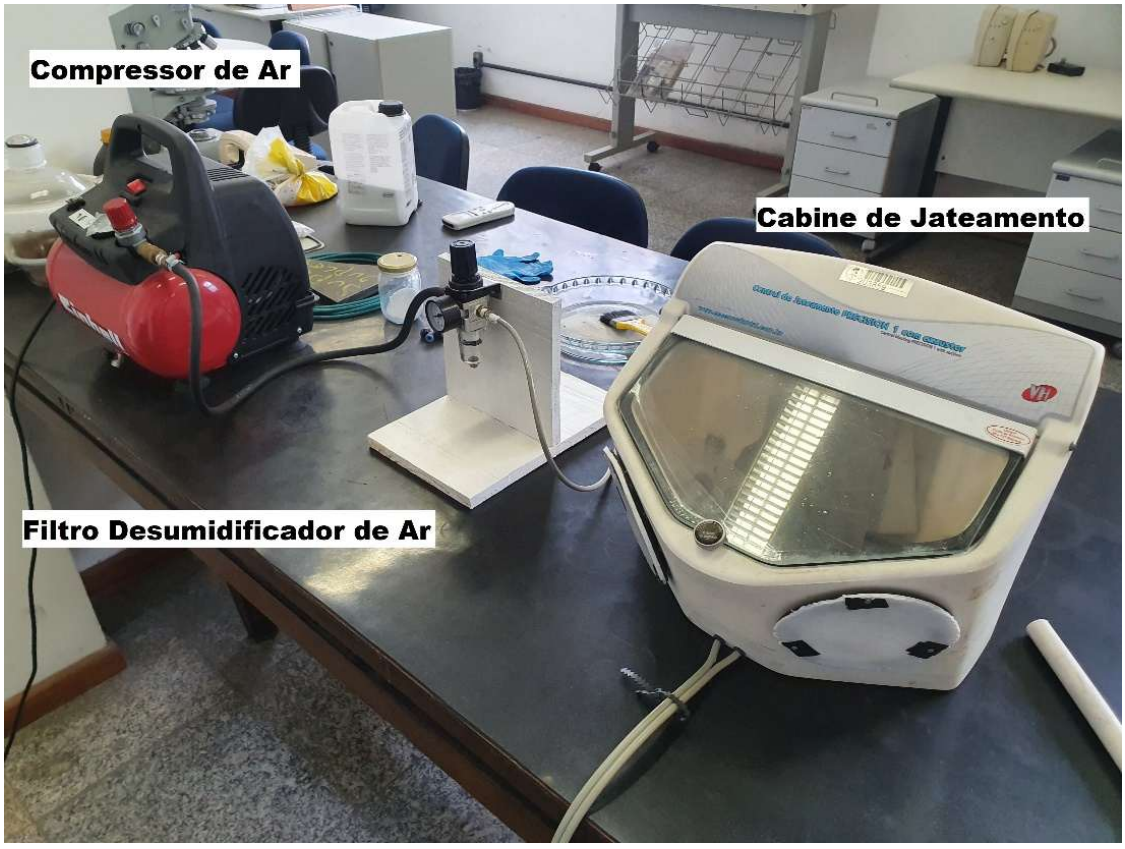


Figura 21: Cabine de Jateamento e compressor (Fonte: Próprio Autor).

No interior da cabine, a peça foi instalada sobre um suporte capaz de sustentar o bico jateador, além de permitir a regulagem da inclinação do jato. Portanto, as peças foram todas jateadas com o ângulo de incidência de 90º (Figura 22).



Figura 22: Suporte de peças com regulagem angular do bico jateador e bico jateador (Fonte: Próprio Autor).

Devido à ocorrência constante de entupimentos da máquina, havia a dificuldade em alcançar a repetibilidade dos resultados, por isso foi realizada a adaptação do experimento, A adaptação consistiu em retirar por completo o abrasivo da cabine jateadora e dispondo aquele em um recipiente à parte (Figura 23). A mangueira de alimentação do erodente foi desconectada do interior da cabine jateadora e utilizada para aspirar a alumina de dentro do recipiente externo.



Figura 23: Solução adotada para alcançar uniformidade do jateamento. A alumina era fornecida diretamente do pote e fora da cabine da cabine de jateamento (Fonte: Próprio Autor).

Essa solução permitiu o jateamento com uniformidade, sem interrupções do fluxo de partículas durante o tempo de ensaio para o teste de desgaste, isto é, até o esgotamento por completo de massa de abrasivo no recipiente. A massa de abrasivo no recipiente era de aproximadamente 250g de alumina angular. Ao término do processo, as peças de aço usadas no processo inicial de calibração do experimento, apresentaram um nível de erosão bem pronunciado (Figura 24). Não foi executado qualquer acabamento superficial nas amostras de SAE-1020, portanto suas superfícies estavam conforme recebidas.

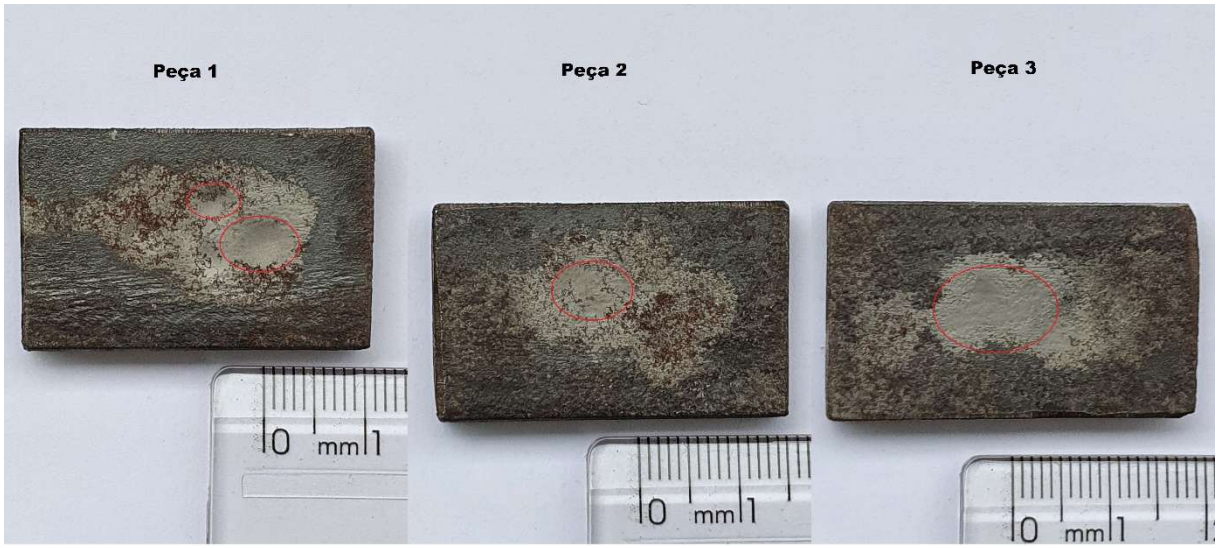


Figura 24: Erosão em amostras de aço 1020 empregada na calibração. Regiões erodidas destacadas em vermelho. Imagem obtida com celular Samsung Galaxy S10, Zoom 4X. Com escala. (Fonte: Próprio Autor).

De acordo com a norma ASTM G76-05 (2005) [83], a erosão é definida como a remoção gradual de material de uma superfície sólida devido ao impacto de partículas sólidas ou de um fluido em movimento. A Taxa de Erosão de um material, expressa em miligramas por grama (mg/g), é determinada pela relação entre a massa erodida da amostra submetida ao jateamento, medida em miligramas por minuto (mg/s), e a taxa de alimentação do abrasivo sobre a amostra, expressa em gramas por minuto (g/s), conforme descrito na Equação (1).

O processo de calibração foi inicialmente feito com uma pressão de $2 \cdot 10^5$ Pa (2 Bar), durante um tempo de 120 segundos. O valor da massa de material abrasivo jateado durante 120 segundos foi de 73, 9611g, aferido com o uso da balança de precisão do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da UERJ, modelo AY 220, da marca Marte, com capacidade para 220g e resolução de 0,0001g.

$$E = \frac{Massa\ de\ Material\ Removido/segundo}{Massa\ de\ Material\ Abrasivo\ Jateado/segundo} \quad (1)$$

2.7 - Análise Microestrutural

2.7.1 - Microscopia Óptica

As imagens de microscopia óptica das amostras erodidas (MO) foram feitas no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT - CEFET/RJ), utilizando o Microscópio Óptico da Marca Olympus, modelo BX60M, em 3 amostras com acabamentos distintos.

Esta técnica permitiu identificar as regiões onde se localizam o substrato e a camada de revestimento e a interface substrato/revestimento.

2.7.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

2.7.2.1 - Análise Morfológica da Superfície do Revestimento

As análises MEV utilizaram um microscópio eletrônico de varredura (MEV) do tipo “Field Emission Gun”, modelo JSM-7100F da marca JEOL, do Laboratório Multiusuário de Nano fabricação e Caracterização de Nanomateriais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (NANOFAB – UERJ). O equipamento foi operado a 15 keV, em modo de elétrons secundários (SE).

2.7.2.2 - Análise química semi-quantitativa das superfícies após o jateamento abrasivo

A técnica de microanálise química semi-quantitativa por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) foi utilizada para verificar se o jateamento abrasivo imposto sobre as diferentes amostras, expos ou não o substrato. Buscou-se a detecção de elemento característico do revestimento metálico que neste caso era o Cromo. A análise por EDS foi feita em amostras representantes de cada nível de acabamento, verificando a presença do Cromo (Cr) no interior das crateras de jateamento e em uma região que não havia sido jateada.

Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM3000 da fabricante HITACHI, com um sistema de EDS acoplado (*X- RAY Energy Dispersive Spectroscopy*) da Brucker. O equipamento pertence ao laboratório de microscopia do Instituto Federal do Rio de Janeiro, Campus Paracambi (IFRJ – Paracambi). As fases

geradas pelo revestimento, assim como as redes de óxidos e inclusões formadas foram caracterizadas através da obtenção de 16 diferentes regiões do revestimento da amostra. O microscópio estava operando com detector BSE (elétrons retroespalhados) à 15 kV, baixo vácuo e distância de trabalho de 6,2 mm. Os resultados do EDS foram obtidos por varreduras com duração de 10 minutos cada e analisados pelo programa Quantax da Brucker.

2.7.3 - Ensaio de Corrosão por Polarização Potenciodinâmica

O ensaio de polarização potenciodinâmica é utilizado para determinar a suscetibilidade à corrosão em várias ligas de ferro, níquel e cobalto, em um ambiente com cloro [84].

O teste consiste em polarizar o sistema em direção a potenciais mais positivos do que os potenciais de circuito aberto (OCP), até que a corrente atinja um valor determinado.

Uma solução aquosa de 3,5% de NaCl foi utilizada como eletrólito no teste eletroquímico. Todos os potenciais mencionados neste estudo foram referenciados ao eletrodo de calomelano saturado (SCE).

No teste foi utilizado um potenciostato modelo PGSTAT204 (Voltagem: 100 – 240V ~ 75VA 50/60 Hz), da marca Metrohm Autolab, pertencente ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ). O equipamento é apresentado na Figura 25a; uma célula de corrosão foi utilizada com o potenciostato, conforme Figura 25b. A célula eletroquímica utilizada também é composta por um eletrodo de trabalho, um contra eletrodo de platina. Os resultados foram analisados pelo “software” NOVA (Versão 2.1.2), que forneceu as curvas e os dados da variação do potencial e da corrente.

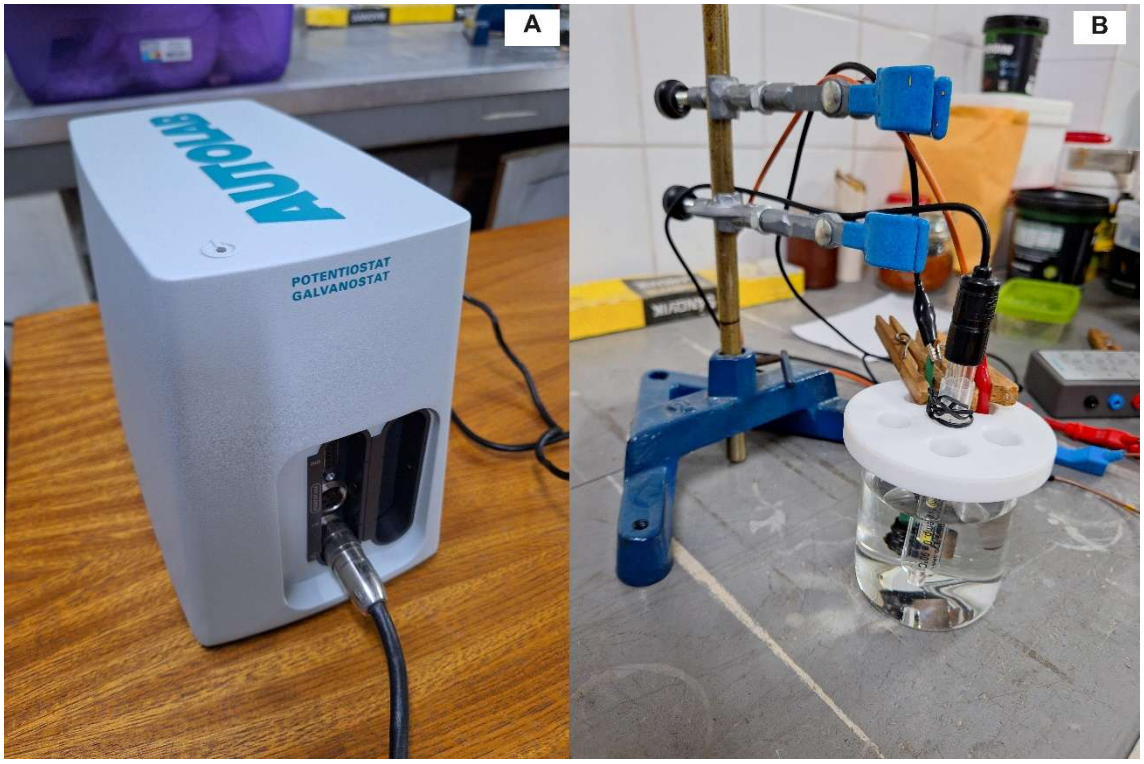


Figura 25: (a) Potenciostato modelo PGSTAT204; (b) Célula de corrosão.

Para o ensaio, foram preparados três corpos de prova para cada nível de acabamento e um corpo de prova para a região do substrato (Figura 26).

Os eletrodos de trabalho foram cortados com uma área de superfície exposta de aproximadamente 1,5 cm² e limpas com álcool antes de serem secadas com um secador de cabelo. No outro lado do revestimento, um fio de cobre foi soldado com solda de estanho e a amostra foi então selada com resina epóxi, expondo apenas a superfície da região de interesse.

A célula eletroquímica foi imersa em uma solução de cloreto de sódio (NaCl) a 3,5% em massa, mantida a 25°C. Para a obtenção das curvas de polarização anódica e catódica, foi necessário estabilizar o potencial de circuito aberto (E_{PCA}) do eletrodo de trabalho em cada ensaio. O sistema permaneceu em estabilização por 20 minutos antes da medição. A partir do E_{PCA}, foram registradas as curvas de polarização, considerando potenciais mais positivos para a polarização anódica e mais negativos para a catódica.

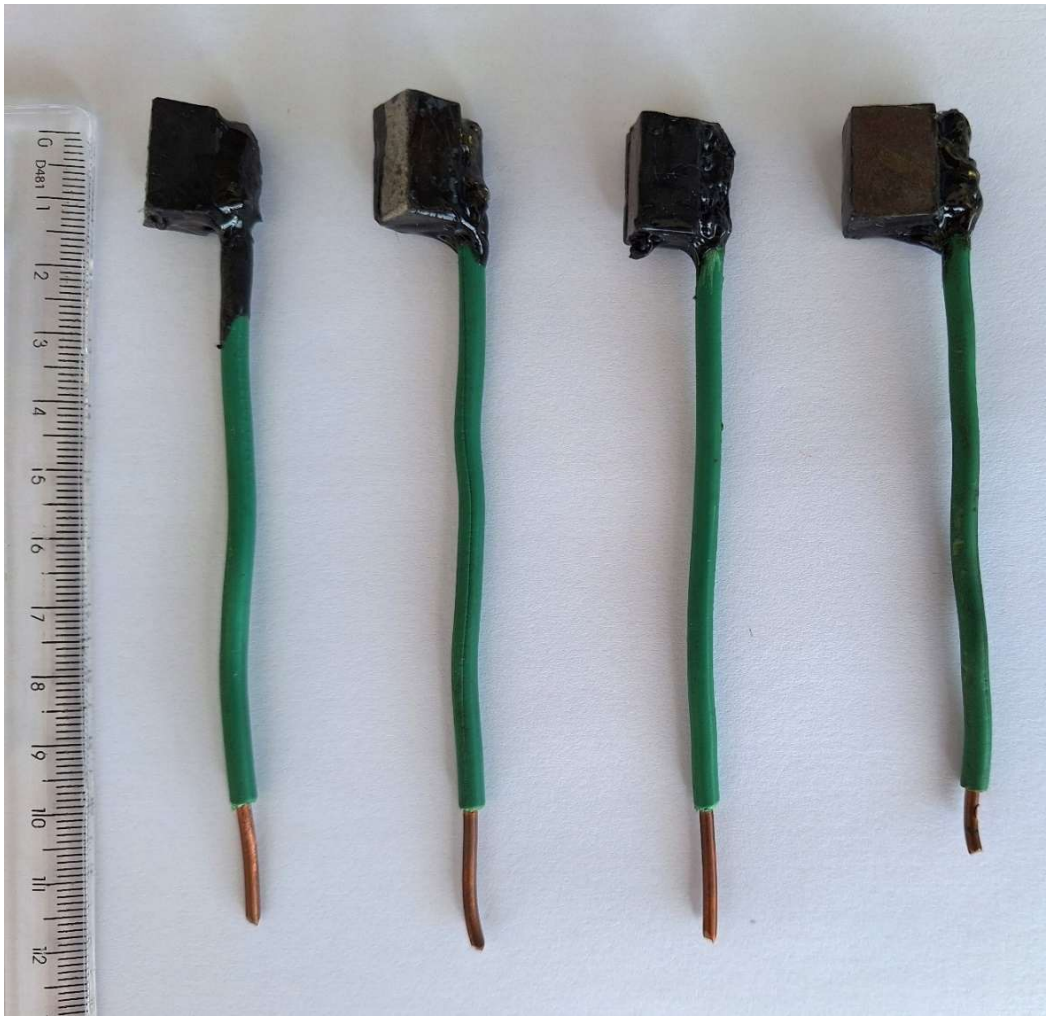


Figura 26: Corpos de provas para ensaio de ensaio de polarização potenciodinâmica.

3 - Resultados e Discussão

3.1 - Microscopia Óptica

As Figuras 27 e 28 mostram o aspecto da secção transversal do revestimento estudado neste trabalho, na Amostra 8, que não sofreu nenhum tipo de acabamento superficial, permitindo considerações qualitativas de características inerentes aos revestimentos obtidos por arco elétrico, como a presença de descontinuidades arredondadas (poros) e alongadas (trincas). Além disso, pode-se observar uma região de trincas onduladas que podem ter sido causadas pela baixa adesão no momento de empilhamento das lamelas geradas pelo impacto de partículas do material aspergido.

Os aspectos das Figuras 27 e 28 vão ao encontro daquele estudado por Campos *et al.* [70], em sua pesquisa com a mesma liga onde os revestimentos apresentaram alguns defeitos típicos, tais como: partículas parcialmente fundidas, óxidos, trincas e porosidades. A presença de poros e trincas interconectadas pode reduzir a efetividade da camada aspergida protetora e é um parâmetro a ser observado.

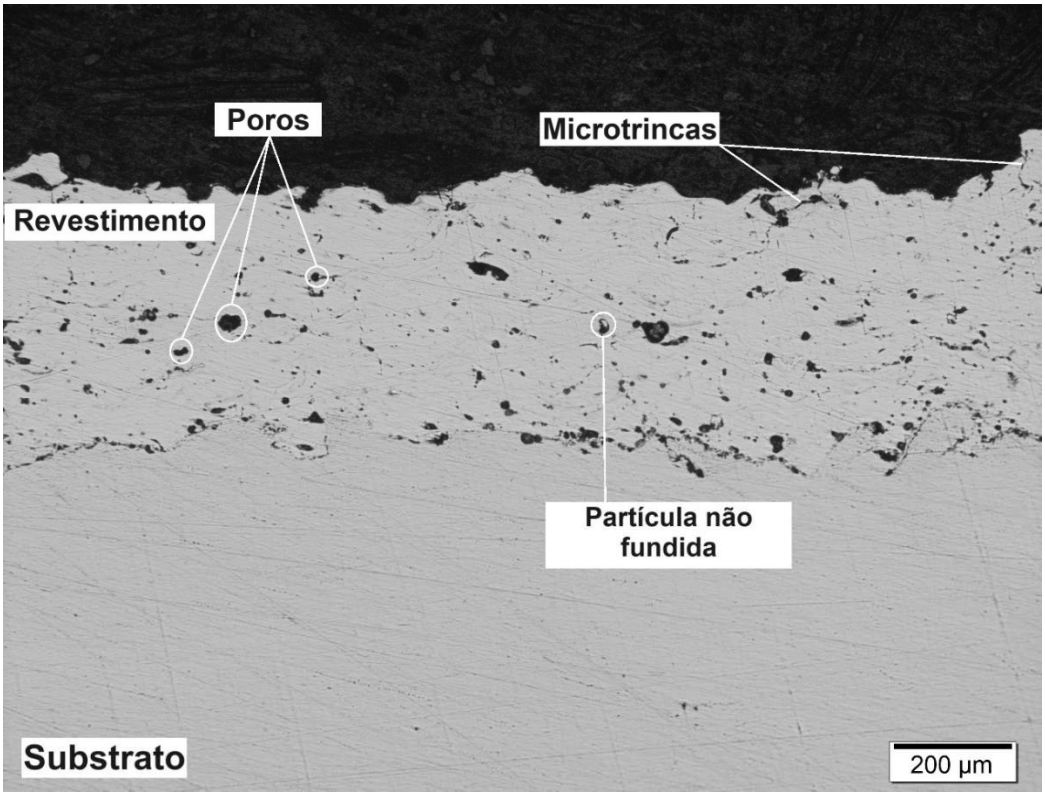


Figura 27: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na de seção transversal da amostra como recebida do revestimento.

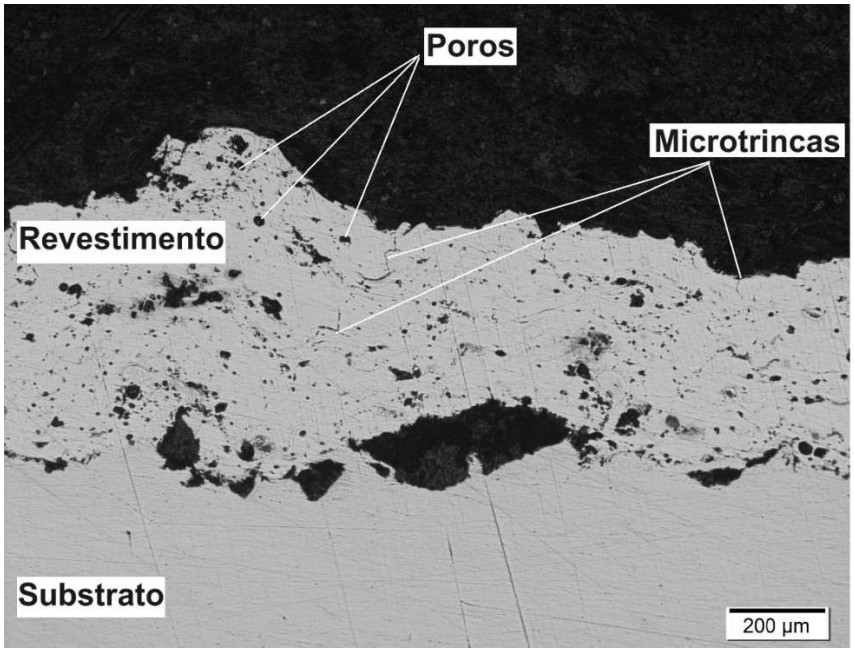


Figura 28: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra como recebida do revestimento. (Fonte: Próprio Autor).

A Figura 29 apresenta o aspecto da secção transversal do revestimento estudado neste trabalho, na que sofreu acabamento superficial intermediário.

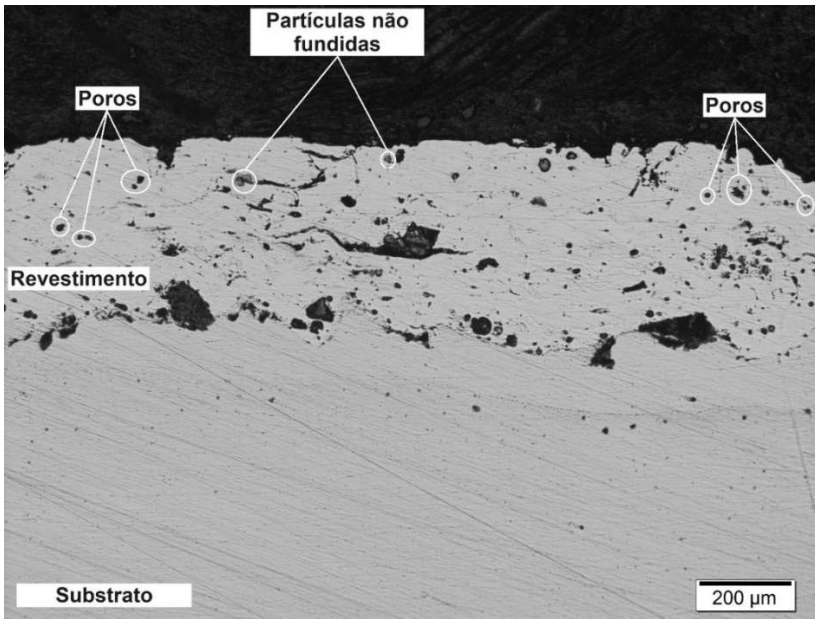


Figura 29: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra com acabamento intermediário do revestimento. (Fonte: Próprio Autor).

Na imagem da Figura 30, verifica-se além das características inerentes aos revestimentos obtidos por arco elétrico, o topo mais plano em comparação ao da Amostra 8 devido ao acabamento superficial sofrido pela amostra.

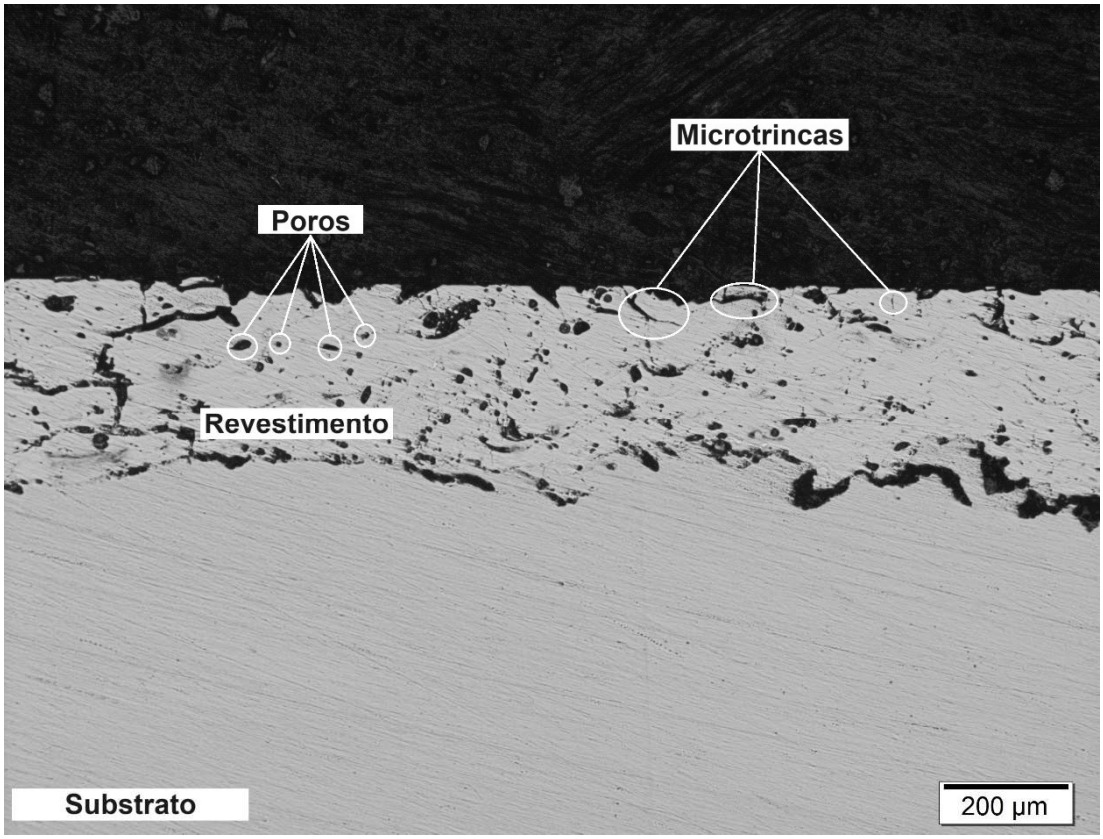


Figura 30: Aspecto obtido por MO mostrando defeitos na seção transversal da amostra com acabamento fino do revestimento. (Fonte: Próprio Autor).

3.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

3.2.1 - Revestimento sem acabamento

A superfície mostrou textura irregular, (Figuras 31 e 32) uma característica de revestimentos aspergidos termicamente, dado ao impacto e empilhamento de partículas fundidas sobre partículas solidificadas, semelhante ao encontrado por Bassam *et al.* [85].

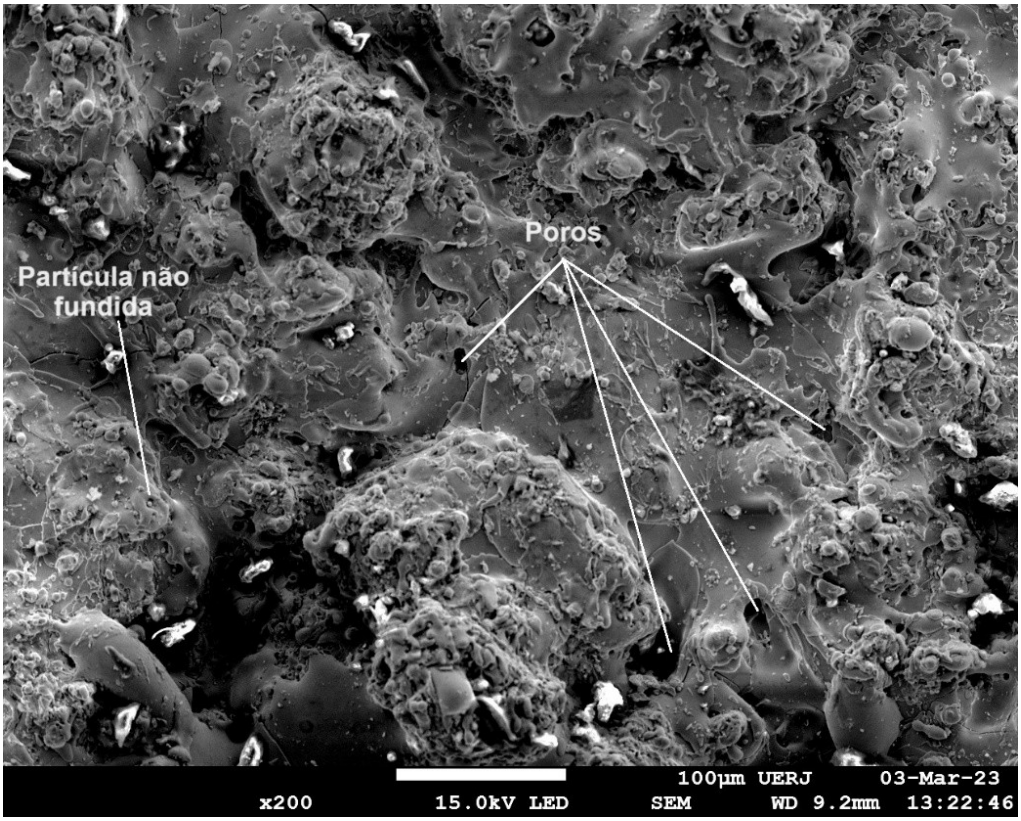


Figura 31: Aspecto da superfície de amostra como aspergida.

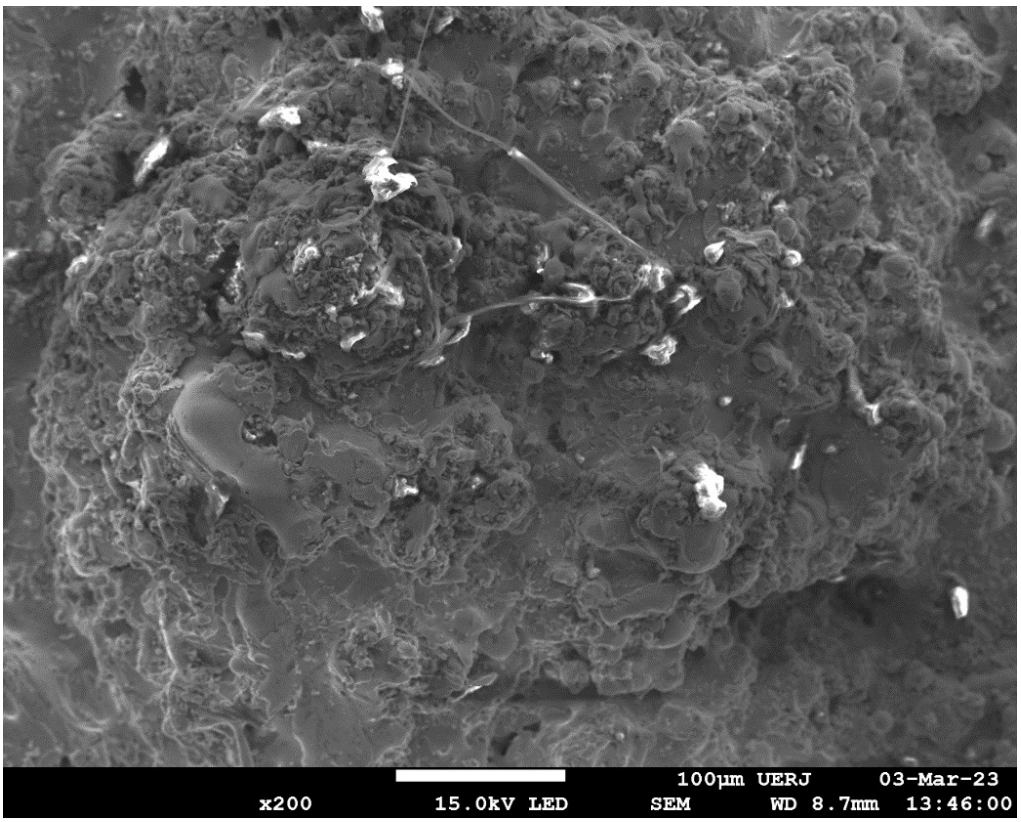


Figura 32: Aspecto da superfície de amostra como aspergida.

Foram identificados no revestimento uma grande quantidade de vazios, partículas não fundidas e trincas, apresentados nas Figuras 33 e 34. Tais características inerentes a um revestimento aspergido pela técnica de Arco Elétrico também foram encontradas por Bassam *et al.* [85], Liu *et al.* [86] e Kumar *et al.* [87]. Segundo Campos *et al.* [70], o revestimento apresentou uma fração volumétrica de poros no valor de 5,6% ± 3,0 para a chapa revestida com a Liga B.

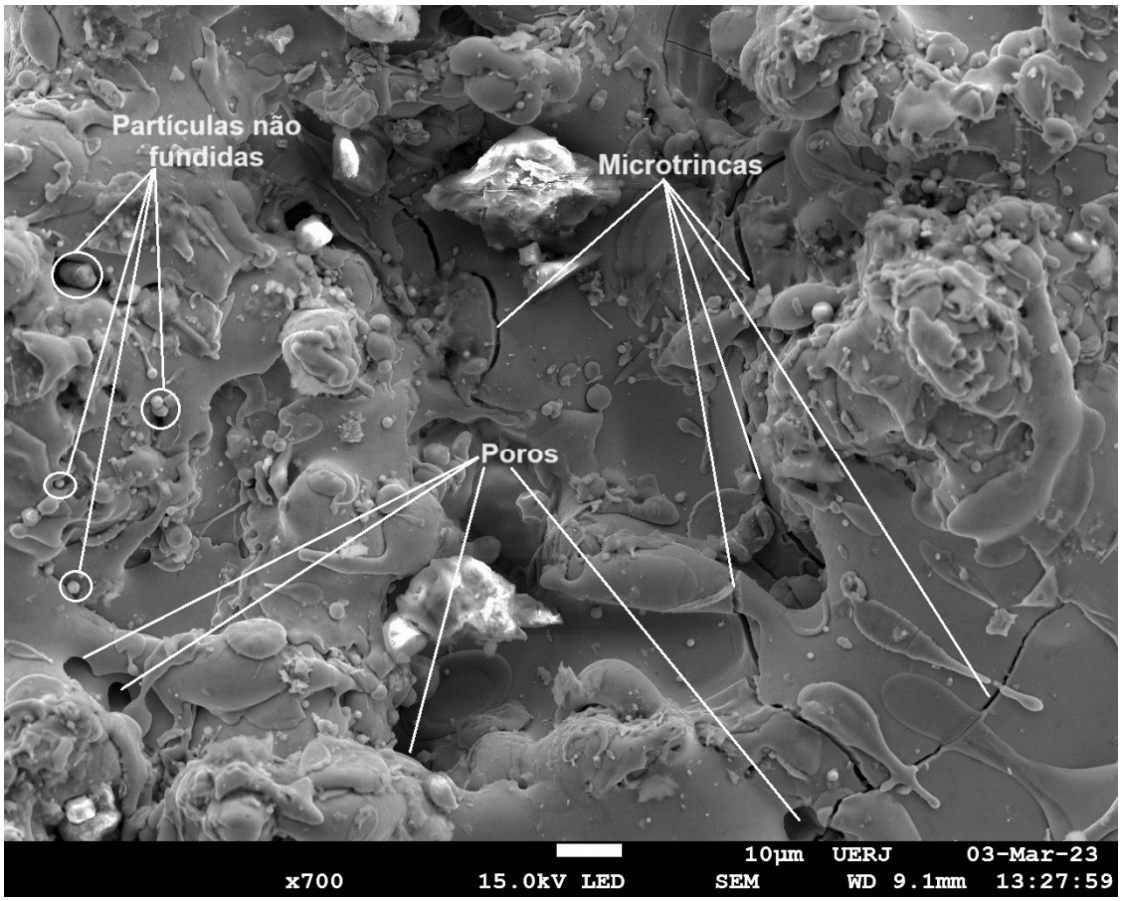


Figura 33: Micrografia eletrônica de varredura de amostra como aspergida em maior detalhe.

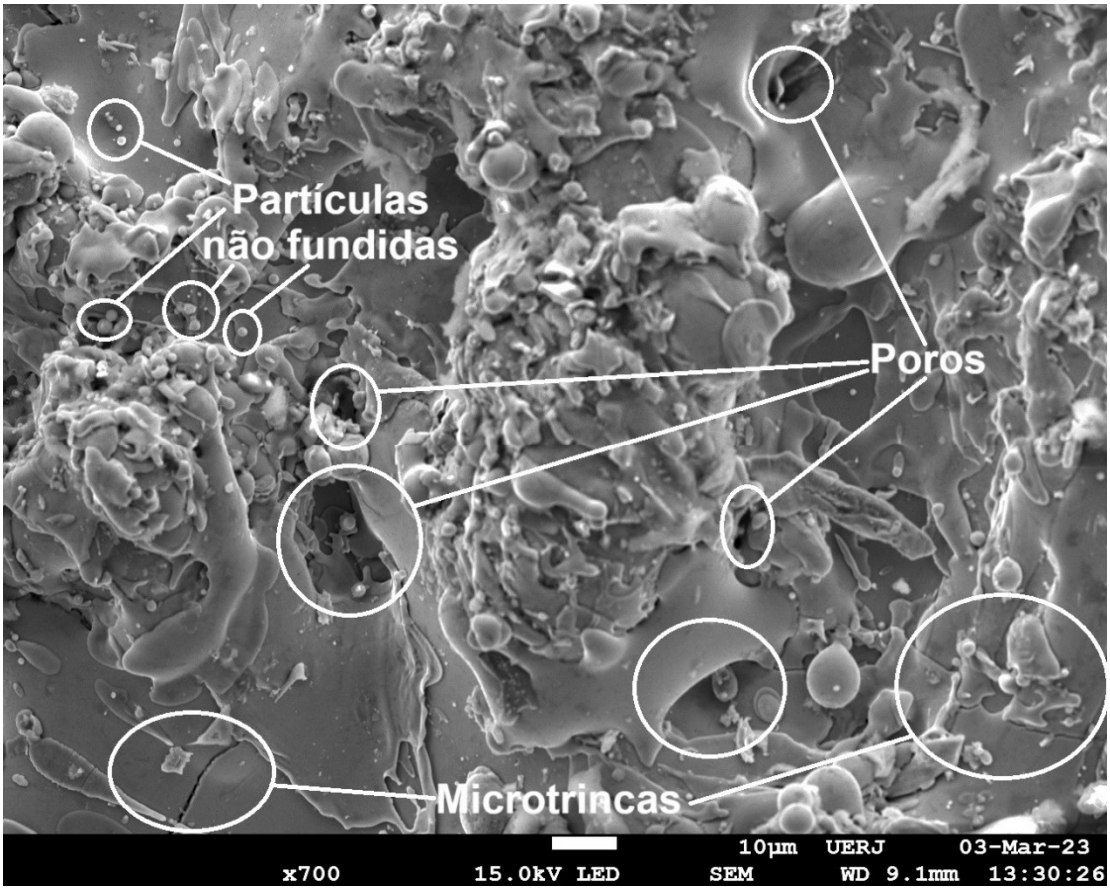


Figura 34: Micrografia eletrônica de varredura de amostra como aspergida em maior detalhe, mostrando empilhamento de partículas.

A Figura 35 mostra uma região do revestimento como aspergido, nela é possível identificar as mesmas características morfológicas já destacadas nas Figuras 31, 32, 33 e 34, contudo, a figura mostra áreas de porosidades e microfissuras que estão apresentadas em detalhe de maior magnificação na Figura 36, verifica-se a presença de 3 poros dentro de uma lacuna formada pelo empilhamento das lamelas.

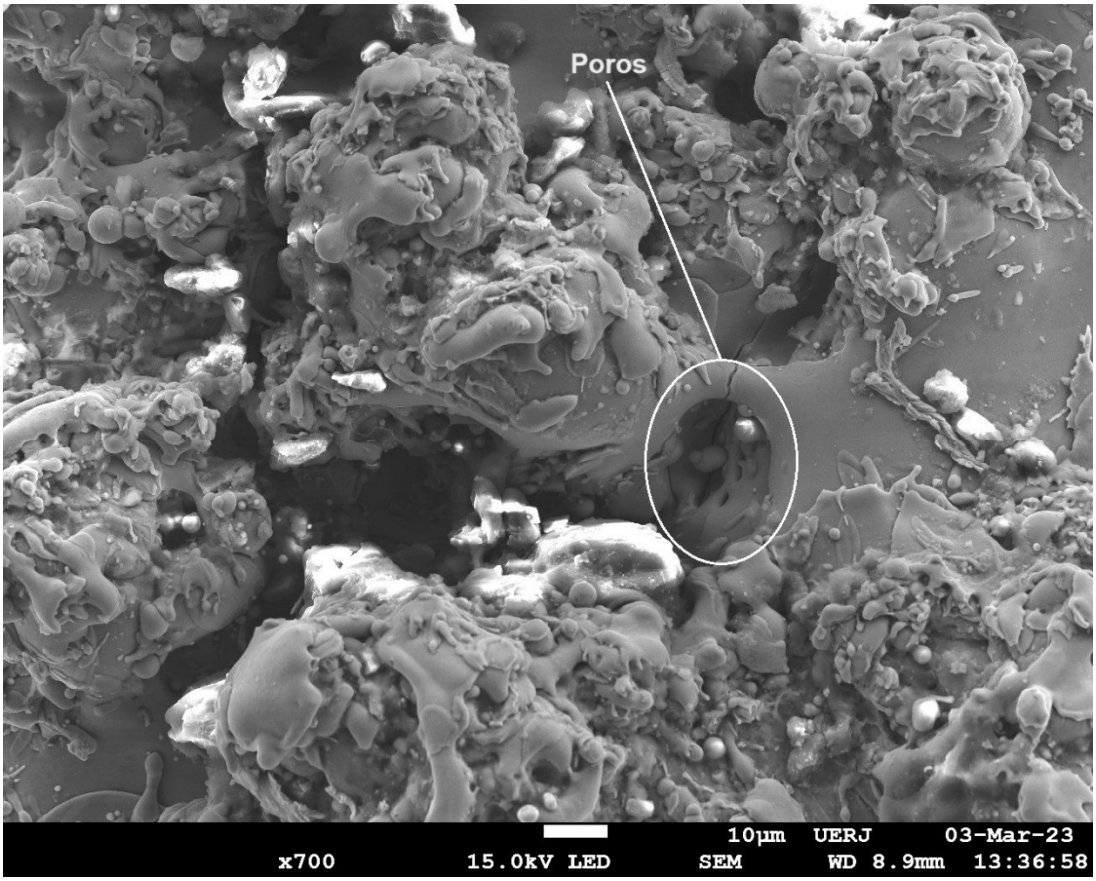


Figura 35: Micrografia eletrônica de varredura do revestimento apresentando porosidades.

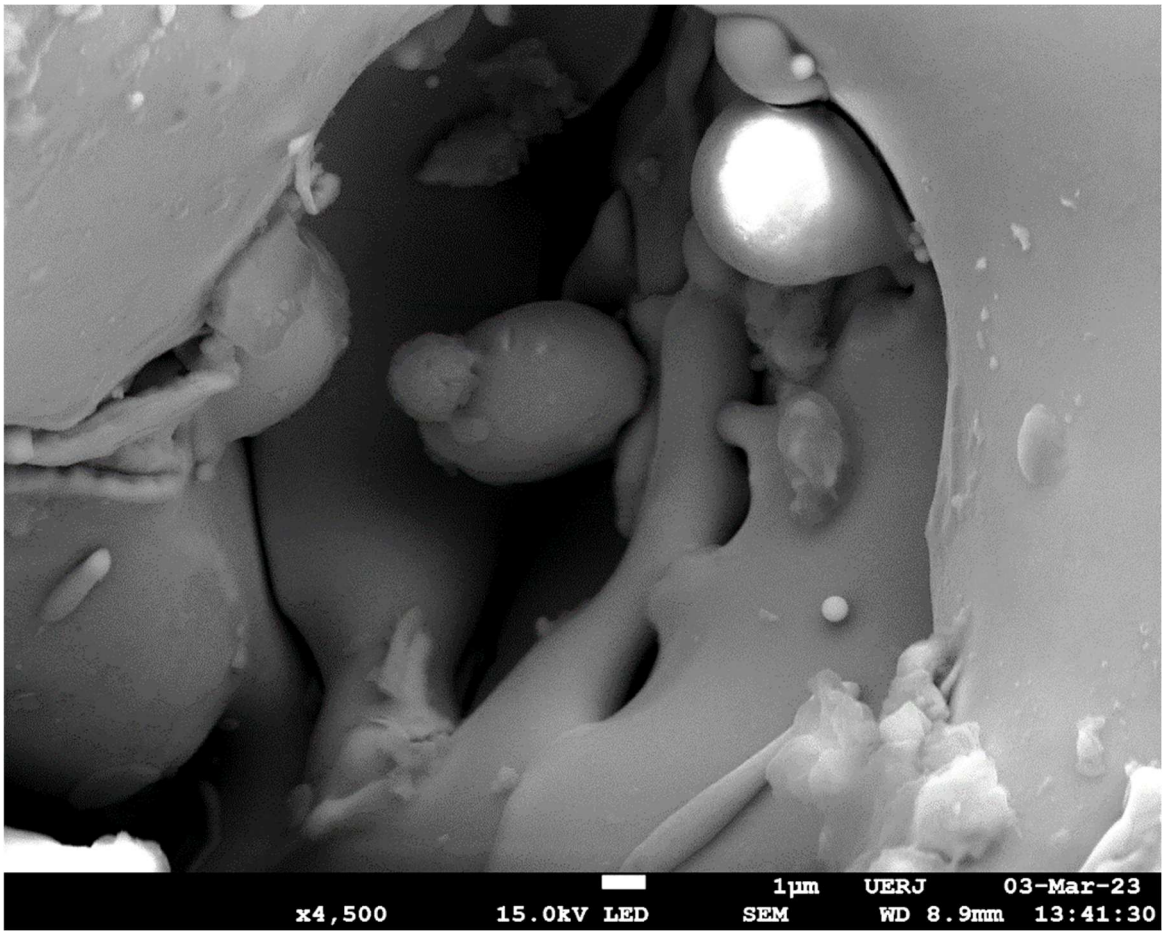


Figura 36: Detalhe de porosidades dentro do revestimento, na área demarcada da Figura 36.

A Figura 37 mostra a presença de partículas não fundidas e microfissuras no revestimento sob um aumento de 2000X.

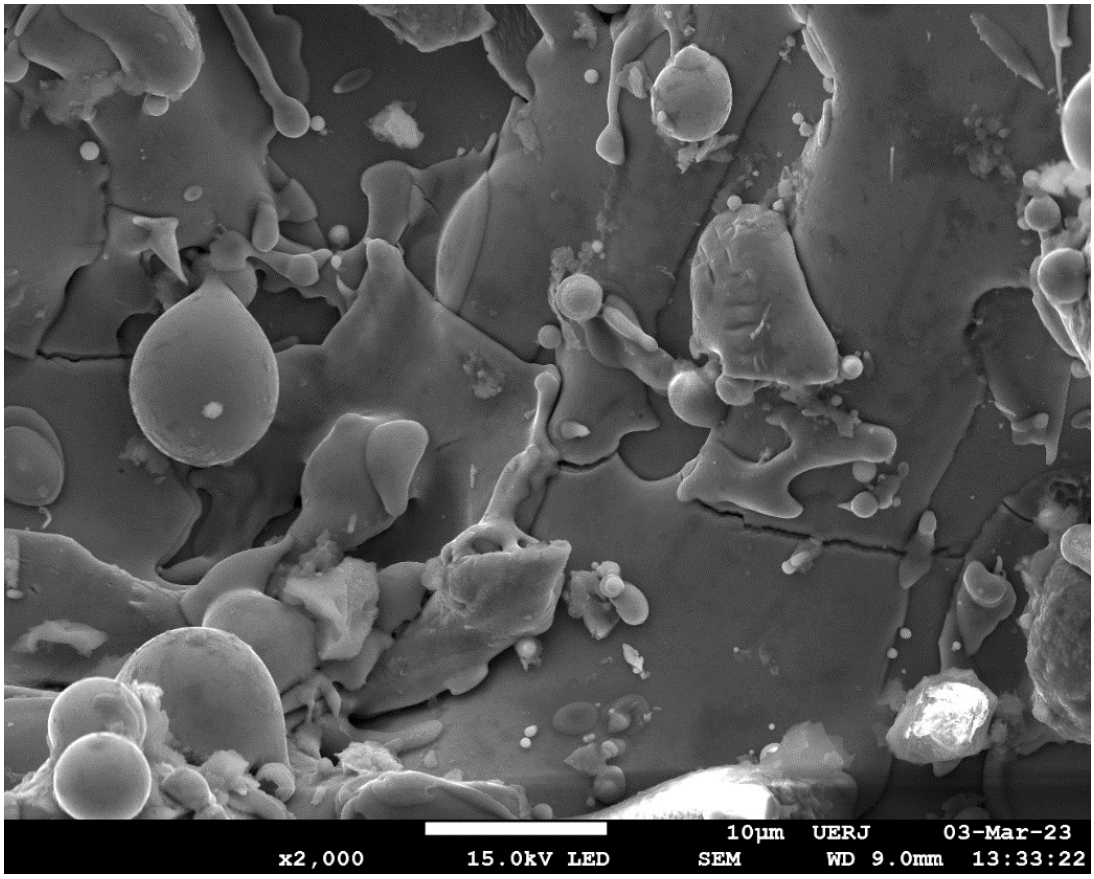


Figura 37: Presença de partículas não fundidas e microfissuras no revestimento.

3.2.2 - Revestimento após Acabamento Superficial

As Figuras 38, 39, 40 e 41 são imagens obtidas por MEV, que mostram respectivamente a superfície das amostras submetidas a uma profundidade de usinagem menor, um acabamento intermediário, com aumento de 450X.

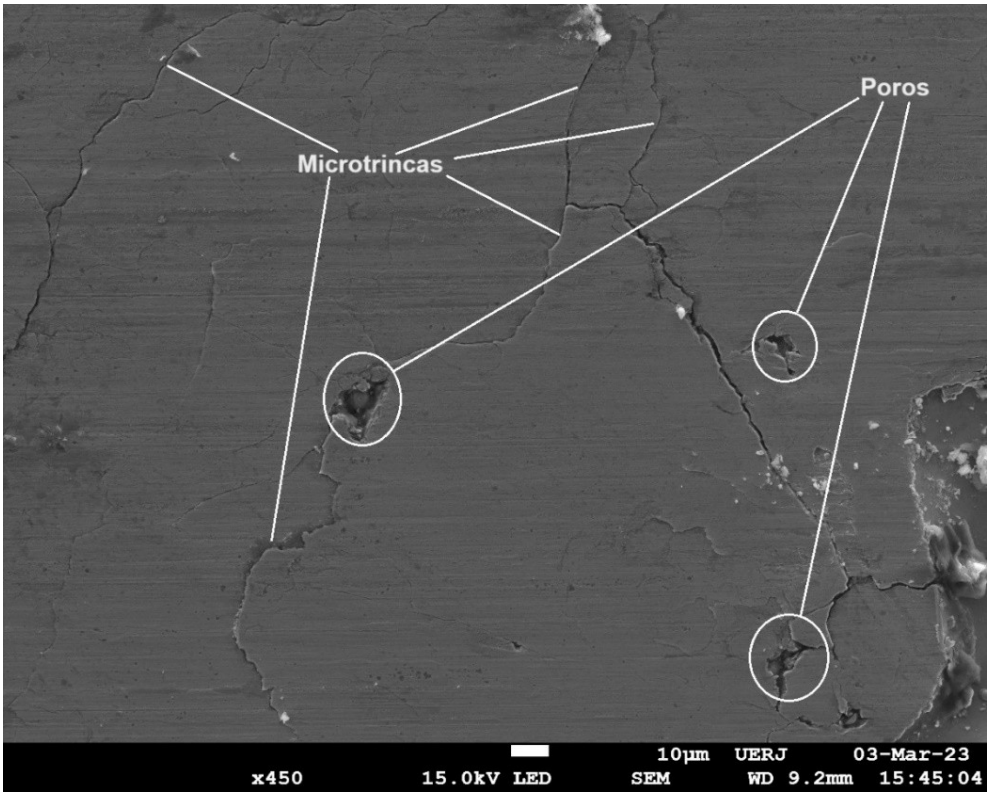


Figura 38: Superfície submetida a acabamento intermediário.

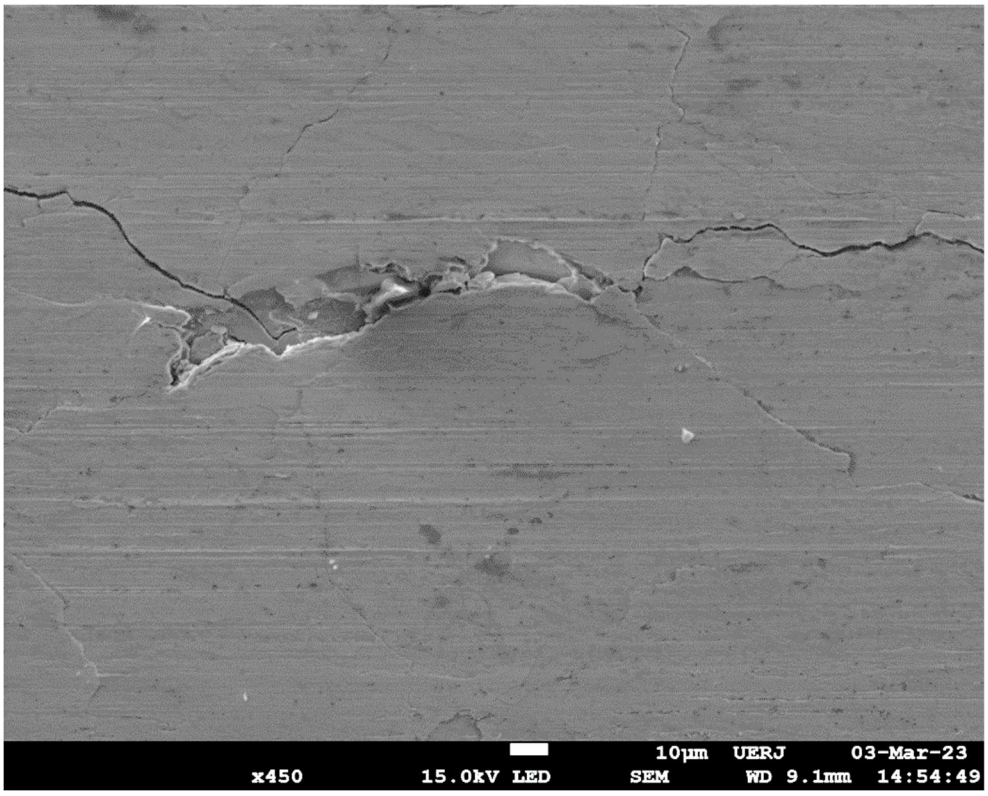


Figura 39: Microtrincas e marcas de usinagem em superfície com acabamento intermediário.

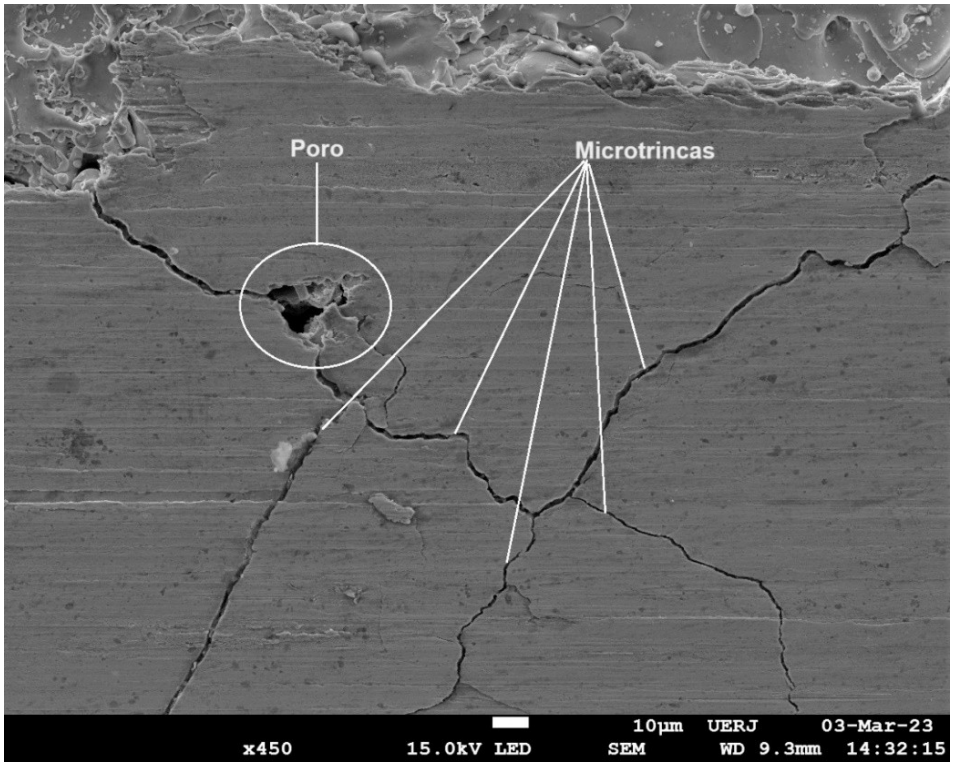


Figura 40: Microtrincas e porosidade em superfície com acabamento intermediário.

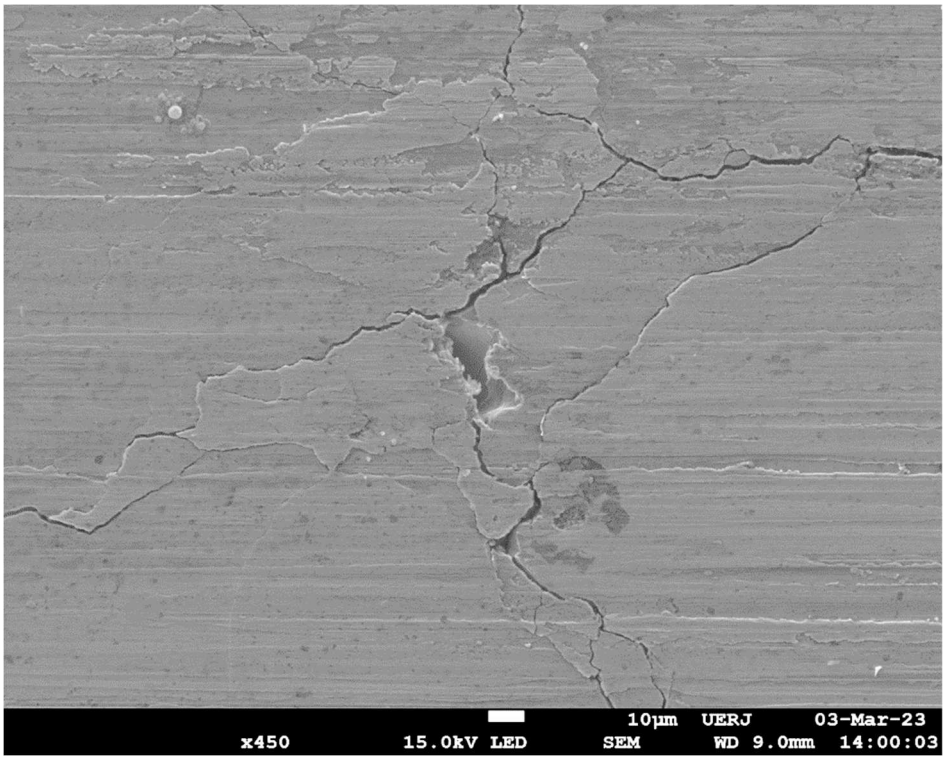


Figura 41: Defeitos em superfície submetida a acabamento intermediário.

Nas figuras, é possível identificar as marcas de retífica como característica predominante na superfície. Também é possível observar a presença de defeitos oriundos do processo de Aspersão Térmica, como vazios e trincas.

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam regiões das amostras 1, 2 e 3, que sofreram um acabamento mais fino.

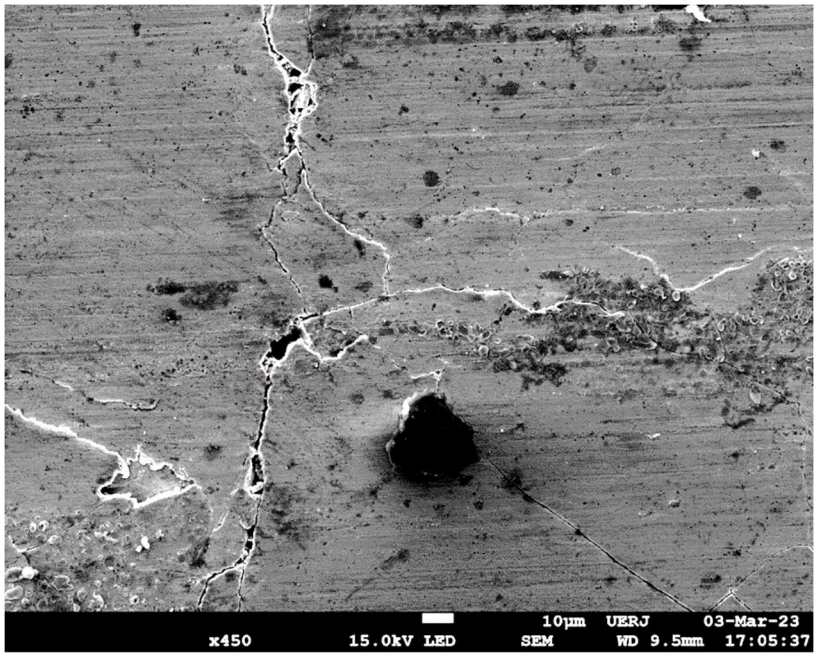


Figura 42: Superfície submetida a acabamento fino.

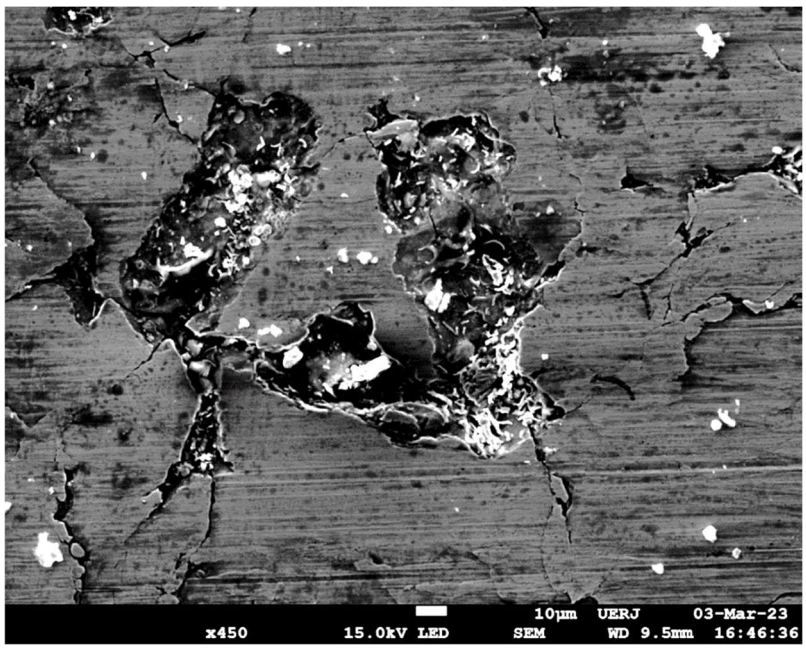


Figura 43: Defeitos em superfície submetida a acabamento fino.

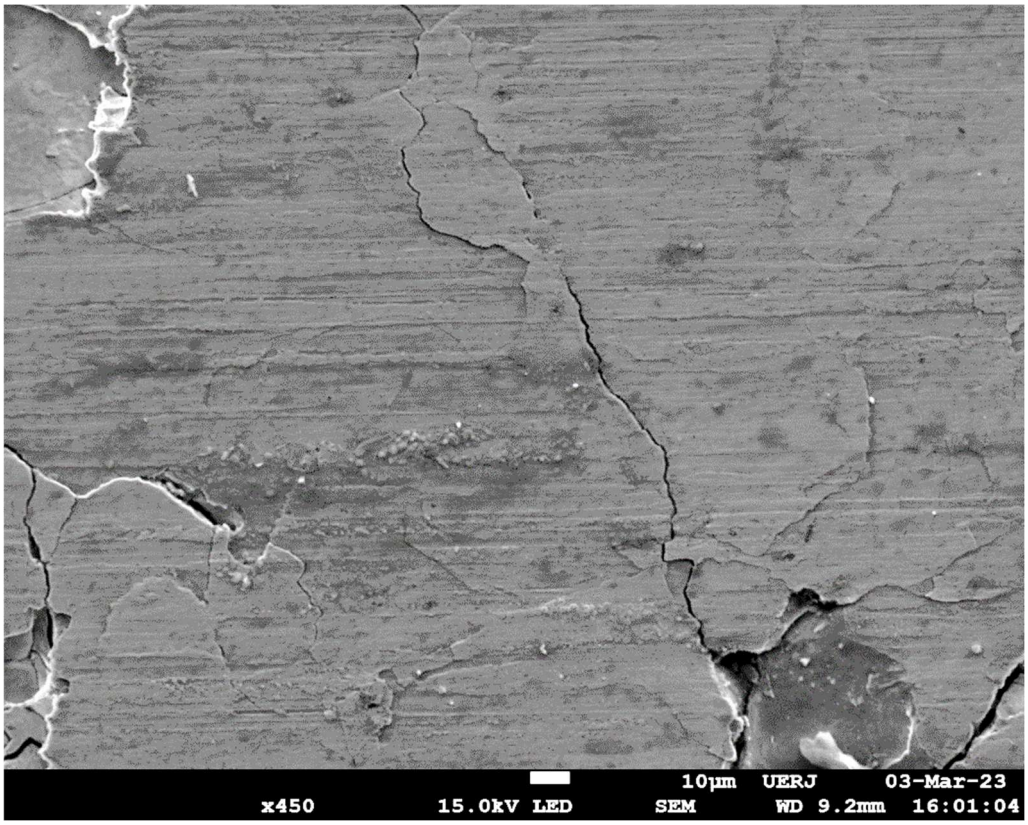


Figura 44: Microtrincas e marcas de usinagem em superfície com acabamento fino.

Nas figuras, também é observada a presença de defeitos oriundos do processo de Aspersão Térmica, como vazios e trincas. Contudo, nota-se que as marcas de retífica estão menos pronunciadas quando comparadas às das amostras 4, 5, 6 e 7.

A Figura 45, é uma micrografia da amostra cuja superfície sofreu acabamento intermediário, com aumento de 2000X e nela é possível observar o aspecto de mecanismo frágil para o arrancamento do material, o mesmo aspecto é verificado por Das *et al.* [81]. Nas imagens, são vistas características de mecanismo frágil para o arrancamento do material, como poucas cavidades (dimples) e superfícies de fratura relativamente lisas, aspecto de lascamento, isto é, fragmentos irregulares e serrilhados que se desprendem da superfície, conforme visto em Nie *et al.* [88]. De acordo com Huo *et al.* [82], Mueller *et al.* [89] e Manea *et al.* [90], o comportamento predominantemente frágil do material é caracterizado pela iniciação e propagação de trincas, o que levou à contínua separação de fragmentos na superfície da peça.

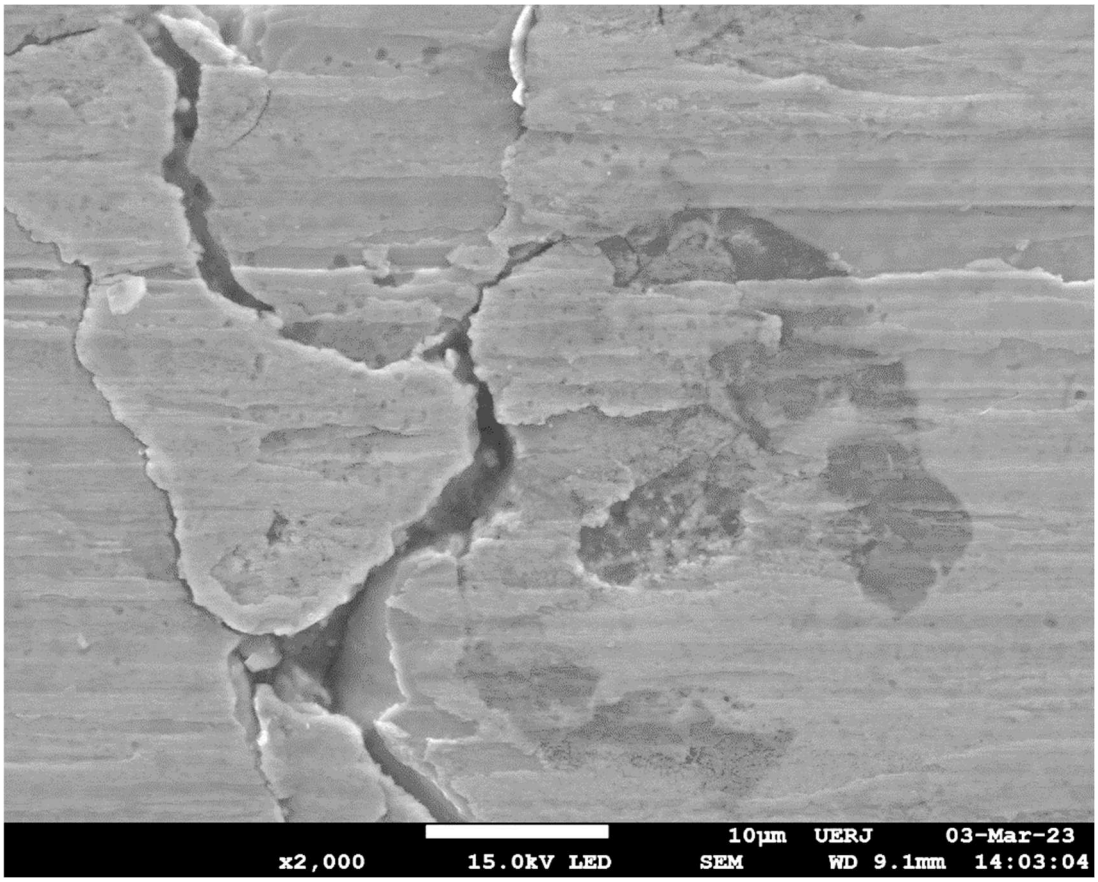


Figura 45: Aspecto de mecanismo frágil para o arrancamento de material em superfície com acabamento intermediário.

3.3 - Ensaio de Rugosidade por Acabamento Superficial

As médias aritméticas das rugosidades (R_a) na direção da retífica, bem como na transversal são mostradas na Tabela 6. A rugosidade também foi medida, nas mesmas direções na peça 8, com acabamento como fabricado. A Tabela 7 apresenta os valores de médias, desvios padrões e coeficientes de variações de acordo com cada direção preferencial das medidas de rugosidade.

O revestimento como fabricado apresentou valores médios entre medições de rugosidades (R_a) de 13,903 µm e 12,133 µm e valores uniformes para cada direção de medições. O trabalho desenvolvido por Campos (2022) *et al.* [70] encontrou para a mesma liga o valor de rugosidade média (R_a) de 247,84 ± 63,46 µm, essa diferença de valores para o mesmo revestimento pode ser creditada ao equipamento utilizado, um perfilômetro no caso de Campos *et al.,* menos sensível e preciso que o rugosímetro. No revestimento metálico obtido por arco elétrico AT proposto por Kant *et al.* [91], o R_a encontrado foi de 2,986 µm. Arif *et al.* [92] obtiveram R_a = 6 µm.

Tabela 6: Resultados do Ensaio de Rugosidade por Acabamento e Direção Preferencial.

Amostra 1	➡	⬇	**Amostra 2**	➡	⬇
Rugosidade (µm)	0,320	0,314	Rugosidade (µm)	0,912	0,157
	0,340	0,439		0,413	0,488
	0,330	0,252		0,310	0,366
Média (µm)	0,330	0,335	Média (µm)	0,545	0,337
Amostra 3	➡	⬇	**Amostra 4**	➡	⬇
Rugosidade (µm)	0,902	0,558	Rugosidade (µm)	2,904	9,595
	0,634	0,671		2,269	3,857
	0,864	0,481		5,098	2,818
Média (µm)	0,800	0,570	Média (µm)	3,424	5,423
Amostra 5	➡	⬇	**Amostra 6**	➡	⬇
Rugosidade (µm)	3,057	5,418	Rugosidade (µm)	2,710	0,981
	5,756	4,193		2,540	1,257
	5,321	2,351		2,705	1,047
Média (µm)	4,711	3,987	Média (µm)	2,652	1,095
Amostra 7	➡	⬇	**Amostra 8**	➡	⬇
Rugosidade (µm)	5,463	11,088	Rugosidade (µm)	13,226	11,914
	7,412	4,743		16,918	13,039
	9,809	1,972		11,565	11,447
Média (µm)	7,561	5,934	Média (µm)	13,903	12,133

Legenda:	⬇	Paralelo à Retífica
	➡	Transversal à Retífica

Tabela 7: Médias, Desvios Padrões e Coeficientes de Variações.

Amostra	**Média Paralelo**	**Desvio Padrão**	**Coeficiente de Variação**	**Média Perpendicular**	**Desvio Padrão**	**Coeficiente de Variação**
1	0,335	0,095	28,434%	0,330	0,010	3,030%
2	0,337	0,167	49,672%	0,545	0,322	59,078%
3	0,570	0,096	16,766%	0,800	0,145	18,126%
4	5,423	3,650	67,300%	3,424	1,484	43,356%
5	3,987	1,544	38,718%	4,711	1,449	30,758%
6	1,095	0,144	13,162%	2,652	0,097	3,648%
7	5,934	4,673	78,750%	7,561	2,177	28,789%
8	12,133	0,818	6,745%	13,903	2,740	19,708%

Inicialmente, resultados de R_a, medidos na direção paralela à retífica, permitiram a comparação entre as amostras com acabamento fino (1, 2 e 3) e as amostras com acabamento intermediário (4, 5, 6 e 7). Conforme o apresentado por Liu *et al.* [86], com

o aumento na profundidade de corte para o acabamento (<15 µm), ocorreu a redução do R_a. Isso é creditado ao fato de que com uma baixa profundidade de corte, uma grande quantidade de defeitos provenientes da aspersão térmica foi encontrada na superfície usinada. Com o aumento na profundidade de corte, as marcas de retífica se mostraram mais dominantes.

Foi elaborado um gráfico para análise visual das médias de Rugosidade, a cada direção e em cada peça, conforme Figura 46.

Um estudo dos valores apresentados na Tabela 6, considerando cada medida a cada peça, permite a visualização de algumas evidências:

- Os valores de R_a para a amostra sem acabamento são próximos, o que denota a uniformidade do depósito e morfologia na superfície;
- Os valores de R_a encontrados para as amostras retificadas, mostraram valores sem uniformidade a cada medida, havendo valores mais altos ou mais baixos a cada direção. Tais valores, conforme mostrado por Das *et al.* (2018) [81], são característicos de materiais cujo modo de arrancamento é o de mecanismo frágil, ou seja, pela presença de defeitos e microfissuras a rugosidade mostrou-se independente da direção de medições.

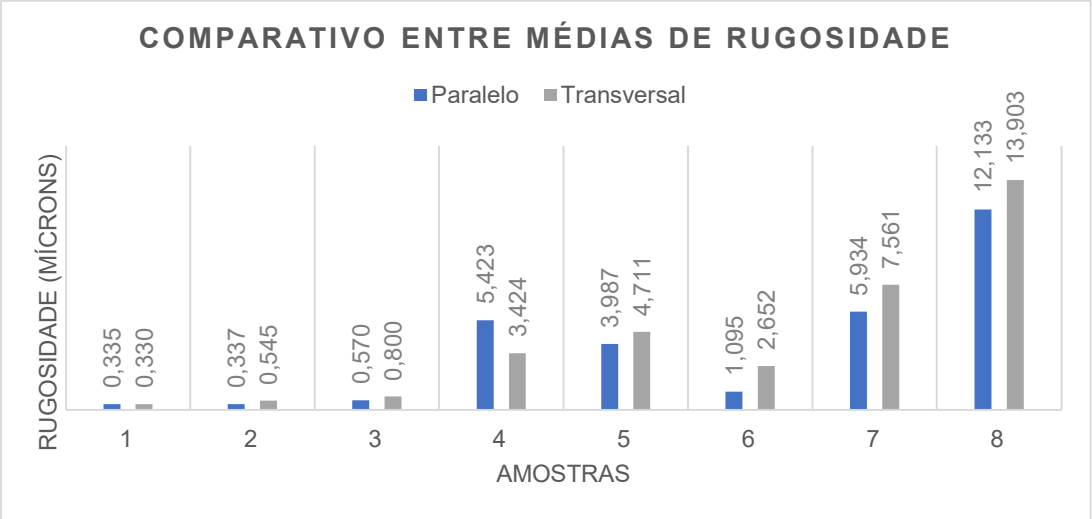


Figura 46: Gráfico comparativo entre médias de rugosidade R_a.

3.4 - Resultados de Calibração

Os resultados de taxa de erosão obtidos para a calibração estão apresentados na Tabela 8:

Tabela 8: Resultados de Calibração $2 \cdot 10^5$ Pa.

Peça	Massa Material Removido (g)	Taxa de Erosão (E) (g/s)
1	0,0055	7,43634E-05
2	0,0049	0,000066251
3	0,0044	5,94907E-05
Média	0,004933333	6,67017E-05
Desvio Padrão	0,000550757	7,44659E-05

Os resultados indicam que a solução de colocar o abrasivo em um recipiente externo à cabine de jateamento, conduzindo manualmente a mangueira de sucção, foi efetiva para o processo, reduzindo bastante as paradas por entupimento, porém sem eliminá-las completamente. Essa solução permitiu atingir boa repetibilidade dos resultados de taxa de abrasão.

Foram executadas mais tentativas de calibração para que fossem obtidos resultados uniformes com o equipamento. Para tanto foi feito um jateamento com 2,5 Bar e 180 s (Tabela 9) e outros três jateamentos com 3 Bar e 180 s (Tabela 10).

Tabela 9: Resultados de Calibração com 2,5·105 Pa (2,5 Bar) e 180 s.

Peça	Massa Material Removido (g)	Taxa de Erosão (E) (g/s)
1	0,004	0,00002344
2	0,0038	0,000022268
3	0,0041	0,000024026

Tabela 10: Resultados de Calibração $3 \cdot 10^5$ Pa (3 Bar) e 120s.

Tentativa	Variações de Massas das Peças (g)			Taxas de Abrasão (g/s)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 1	Peça 2	Peça 3
1	0,0050	0,0051	0,0063	2,3370E-05	2,3837E-05	2,9446E-05
2	0,0060	0,0047	0,0065	2,8044E-05	2,1968E-05	3,0381E-05
3	0,0053	0,0062	0,0054	2,4772E-05	2,8979E-05	2,5240E-05
Média	0,0054	0,0053	0,0061	2,5395E-05	2,4928E-05	2,8356E-05
Desv. Pad.	0,000513	0,000777	0,000585947	2,39854E-06	3,6306E-06	2,73845E-06

Os resultados apresentados na Tabela 10 são os melhores em termos de taxa de erosão pois além de apresentarem a maior uniformidade de valores são os que apresentam resultados mais próximos ao estabelecido na Norma ASTM G76 [86] (0.033 ± 0.008 g/s) e os mais uniformes.

3.5 - Taxas de Erosão

O ensaio de jateamento erosivo foi feito a partir dos resultados encontrados na calibração e podem ser vistos na Tabela 11. No ensaio, foram utilizadas 10 amostras.

Os jateamentos foram feitos sobre o acabamento feito nos cupons e devido ao empenamento da peça e, consequente reduzida área acabada, algumas amostras não permitiram mais que duas áreas de jateamento.

A Tabela 11 e a Figura 47 mostram os resultados das taxas de erosão para cada nível de acabamento.

Tabela 11: Resultados de Taxas de Erosão após Jateamento.

Peça	Média por Peça	Desvio Padrão	Coef. Variação	Média por Acabamento
1	3,2251E-05	2,22936E-05	0,691260291	**3,038E-05**
2	2,3837E-05	7,47843E-06	0,31372549	
3	3,5055E-05	2,91892E-06	0,08326664	
4	1,9865E-05	7,60157E-06	0,382669552	**2,308E-05**
5	2,3370E-05	1,65251E-05	0,707106781	
6	2,5240E-05	3,30503E-06	0,1309457	
7	2,3837E-05	1,98302E-06	0,083189033	
8	2,5707E-05	2,19081E-05	0,852221211	**2,773E-05**
9	2,4928E-05	9,98462E-06	0,400536749	
10	3,2562E-05	8,23388E-06	0,252865268	

	Totalmente Acabado
	Intermediário
	Sem Acabamento

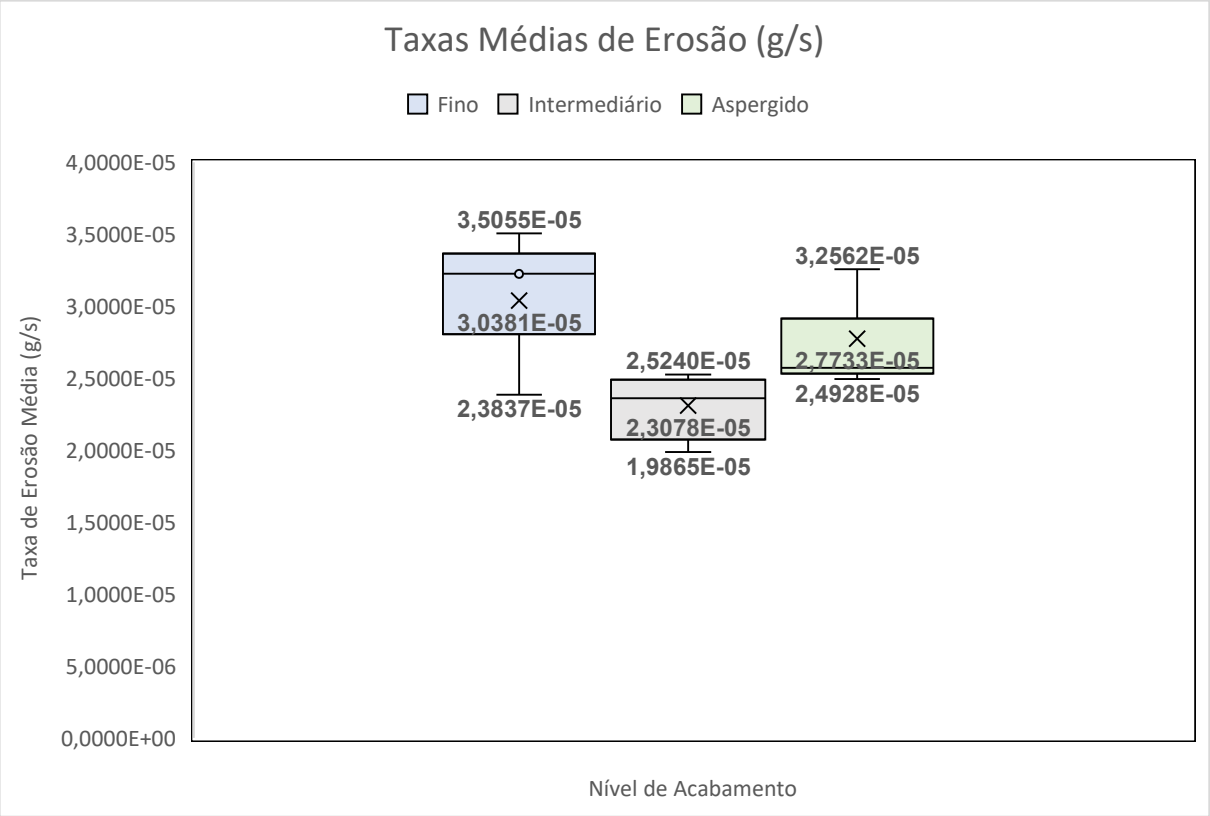


Figura 47: Gráfico das Taxas de Erosão Médias dos níveis de acabamento.

Os resultados indicaram valores aproximados para as taxas de erosão. No intuito de verificar se os valores são estatisticamente próximos, empregou-se a análise ANOVA [93] de fator único e nível de significância de 0,05, os resultados são vistos nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12: Resumo da análise ANOVA.

RESUMO

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
Ac. Fino	3	9,11E-05	3,04E-05	3,41E-11
Ac. Intermediário	4	9,23E-05	2,31E-05	5,22E-12
Sem Acabamento	3	8,32E-05	2,77E-05	1,76E-11

Tabela 13: Resultado da Análise ANOVA.

ANOVA

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	9,63E-11	2	4,82E-11	2,830018	0,125696	4,737414
Dentro dos grupos	1,19E-10	7	1,7E-11			
Total	2,15E-10	9				

A análise ANOVA [93] mostrou que F < F crítico, isto é, o acabamento não influenciou na resistência à erosão. Além disso, como a significância é menor que o Valor-P, pode-se afirmar que não existe uma diferença significativa entre as médias. Ou seja, conclui-se que o acabamento superficial, para o conjunto de amostras estudadas, aspergidas com o processo a arco elétrico manual, com retífica em dois níveis de acabamento superficial e com o processo de jateamento erosivo como apresentado neste trabalho, não foi relevante para aprimorar a resistência ao desgaste erosivo.

No estudo de um revestimento WC-Co-Cr, Murthy *et al.* [94] concluiu que a resistência à erosão do revestimento mostrou-se maior após o acabamento por retífica, em comparação à do revestimento como fabricado. Murthy *et al.* [94] credita esse fato às tensões residuais mais altas, induzidas pela usinagem, que impedem a fratura pela ação de partículas sólidas.

Em seu artigo, Zoei *et al.* [95], após analisar a resistência à erosão do revestimento WC-10Co-4Cr com a técnica pino-e-disco, concluiu que o acabamento feito com processo de retífica melhorou o comportamento do revestimento.

As diferenças encontradas nos resultados do presente estudo, comparados ao estado da arte podem ser creditadas ao fato de se tratar de um processo manual de aspersão, o que resultaria em comportamentos diferentes. Contudo, os resultados indicam que esse material é uma opção promissora para revestimento protetor, quando empregado sem acabamento superficial adicional por usinagem. Esse aspecto é vantajoso para a indústria, pois evita etapas que, além de aumentarem os custos de manutenção com transporte e retífica, também prolongariam o tempo de inatividade da caldeira.

3.6 - Análise química semi-quantitativa das superfícies após o jateamento abrasivo

Foram obtidas 2 imagens de cada nível de acabamento, após o jateamento abrasivo das amostras 1, 6 e 9. As imagens foram feitas no interior e no exterior das crateras de jateamento. O mapa de EDS, apresentado na Figura 48, foi feito para detectar a presença de Cr, como elemento característico do revestimento, e com isso seria possível verificar se o jateamento chegou a expor o substrato. No mapa de EDS o Cr é representado pela cor vermelha.

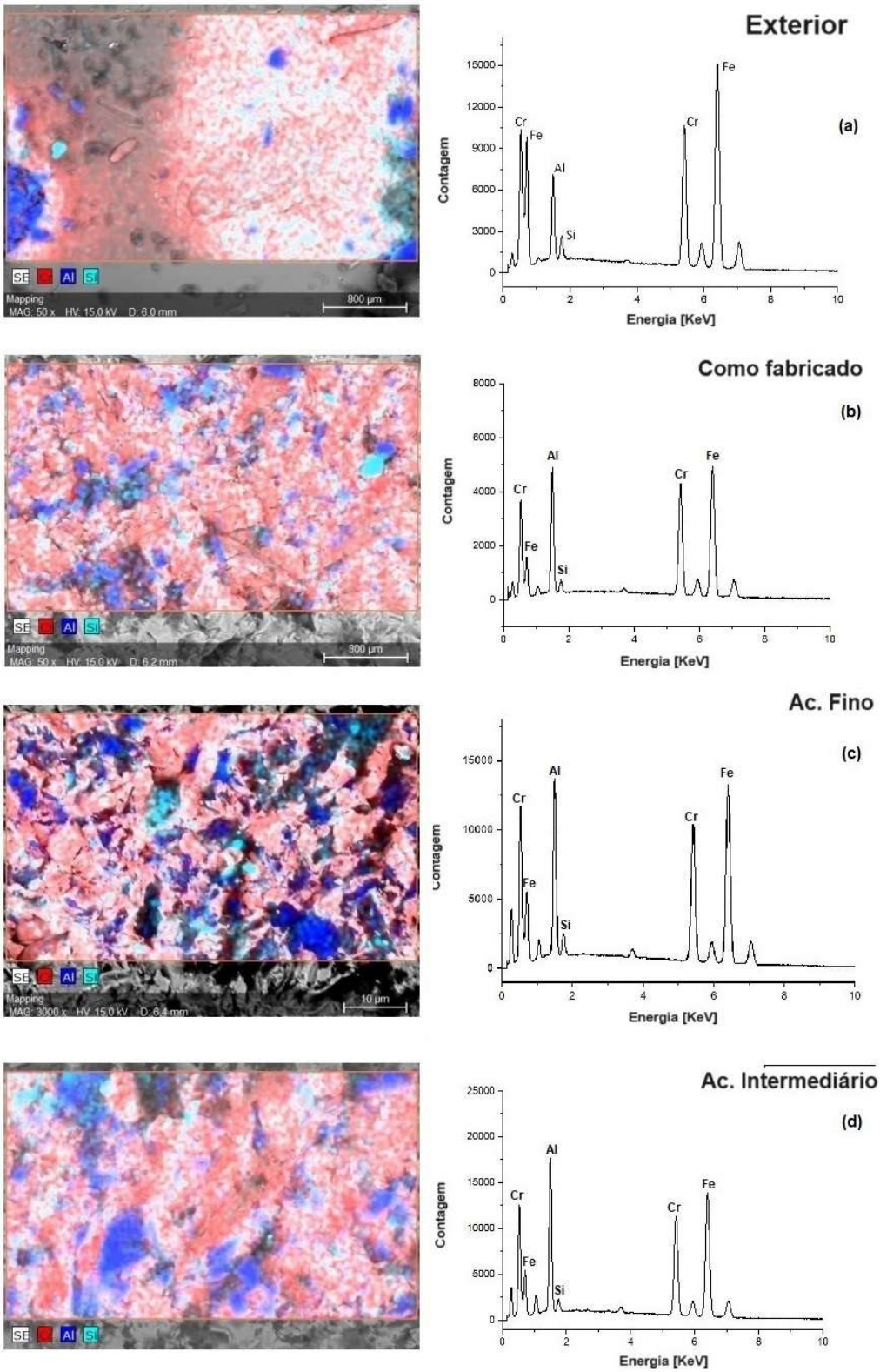


Figura 48: EDS das regiões (a) externa da cratera de jateamento, (b) interna à cratera da amostra como aspergida, (c) interna à cratera da amostra com acabamento fino, (d) interna à cratera da amostra com acabamento intermediário.

Os EDS, feito em cada amostra ilustra a presença de Cr. Isto indica que os acabamentos superficiais não foram suficientes para reduzir a capacidade do revestimento resistir ao desgaste erosivo, uma vez que sendo o substrato de aço ASTM A178 [79], caso exposto, o resultado de EDS não apresentaria presença de Cr.

Os resultados mostraram que resistência ao desgaste erosivo do revestimento Fe-Cr-B-Mn-Si foi mais influenciada pelo aumento da dureza do material, durante o desgaste erosivo, que pelo acabamento de sua superfície. Embora não exista uma relação linear entre dureza e resistência ao desgaste erosivo, em certos casos, as particularidades estruturais do material, como a heterogeneidade da estrutura do compósito, a porosidade e o estado de tensão da superfície, assim como propriedades qualitativas podem ter uma influência mais significativa na resistência ao desgaste do que a dureza global [96] [97] [98]. No entanto, é razoável considerar que uma maior dureza contribua para a resistência ao desgaste em determinadas situações. Apesar de a dureza ter sido historicamente considerada a principal propriedade do material relacionada à resistência ao desgaste, a erosão de materiais metálicos promove simultaneamente tanto o desgaste quanto o encruamento. Como consequência, a dureza da superfície do material-alvo sofre alteração, geralmente aumentando com a progressão da erosão devido ao efeito do encruamento [99].

3.7 – Ensaio de Corrosão por Polarização Potenciodinâmica

As curvas de polarização obtidas para o substrato e cada nível de acabamento e são apresentadas na Figura 49.

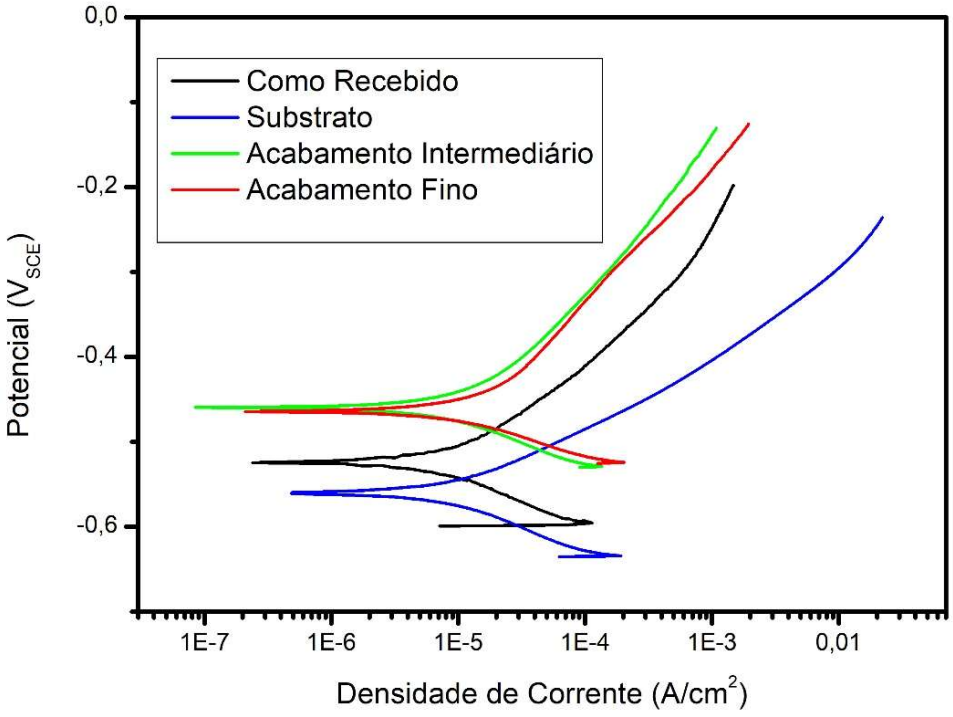


Figura 49: Curvas do ensaio de polarização potenciodinâmica.

A Tabela 14 apresenta os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) e da corrente de corrosão (I_{corr}), identificados na Figura 51 pelo método extrapolação da curva de Tafel, para cada condição. A análise dos potenciais de corrosão (E_{corr}) indicaram uma tendência de movimentação para potenciais mais positivos.

Inicialmente, é possível comparar o potencial do substrato com aquele do revestimento como recebido. O valor de potencial mais alto indica, como já esperado, a proteção anticorrosiva oferecida pelo revestimento. Em um estudo sobre o efeito da composição química da superfície na resistência à corrosão na mistura dos revestimentos de FeCrMoNbB (140MXC) e FeCMnSi (530AS) produzidos pela aspersão por arco elétrico, Rojas-Molano *et al.* [100] observa a ocorrência de um incremento na resistência à corrosão do revestimento, que se reflete no aumento do potencial de corrosão e na diminuição da corrente de troca, indicando um menor fluxo de elétrons do material sob teste.

Os revestimentos submetidos ao acabamento superficial apresentaram potenciais de valores mais altos (-0,47186 V e - 47475 V) quando comparados ao revestimento como recebido (-0,53061). Esse resultado mostra que o acabamento

superficial permitiu elevou a dificuldade de corrosão do revestimento. Em um estudo, onde a superfície de um revestimento aspergido termicamente por arco elétrico foi usinada pelo processo de retífica até a rugosidade superficial R_a de 0,8 μm, Niranatlupong *et al.* [101] apresenta resultado do ensaio de polarização com leve aumento da $\mathbf{E_{corr}}$, além de observar melhora na taxa de corrosão (densidade de corrente). Niranatlupong *et al.* [101] credita esse aprimoramento à suavização da superfície, pela retífica, que ajudou a reduzir o efeito de "pitting" da superfície do revestimento. As cavidades mais rasas na superfície permitem uma melhor circulação da solução, promovendo a formação de uma camada protetora. Em um estudo da microestrutura e resistência à corrosão de revestimentos à base de ferro preparados pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico, Lin *et al.* [102] encontrou potenciais de corrosão (E_{corr}) do revestimento de FeB e do revestimento de FeBSi de aproximadamente -0,758 e -0,738 V, respectivamente, o revestimento FeNiCrBSiNbW exibiu o maior E_{corr} (-0,447 V), creditado pelo autor ao seu baixo teor de óxidos. As densidades de corrente de corrosão (i_{corr}) dos revestimentos de FeB, FeBSi e FeNiCrBSiNbW foram de 18,96, 12,69 e 8,72 μA/cm², respectivamente, mostrando-se em um patamar de valores eletroquímicos próximos aos encontrados no revestimento como recebido aqui estudado (E_{corr} = - 0,53061 V e I_{corr}= 1,001 A/cm²). Lin *et al.* [102] afirmou que o elemento Cr foi benéfico ao proteger o revestimento da dissolução, formando um filme passivo rico em Cr. Os valores de $E_{corr\ e}$ I_{corr} do revestimento como aspergido estudado por Lin *et al.* [102] ficaram muito próximos aqueles encontrados para os revestimentos submetidos ao acabamento superficial, indicando que o acabamento superficial levou os valores eletroquímicos do revestimento para patamares mais nobres de proteção.

Ao comparar os potenciais de corrosão do revestimento submetido ao acabamento intermediário com aquele submetido ao acabamento fino, nota-se uma variação muito pequena no valor, como pode ser visto na Tabela 14, podendo indicar uma estabilidade na proteção anticorrosiva do material.

Tabela 14: Resultados de potenciais, correntes de corrosão e resistências de polarização do substrato e níveis de acabamento do revestimento.

	Substrato	**Sem acabamento**	**Ac. Intermediário**	**Ac. Fino**
E_{corr} (V)	- 0,56274	- 0,53061	- 0,47186	- 0,47475
I_{corr} (A/cm²)	$1{,}1172 \cdot 10^{-5}$	$1{,}001 \cdot 10^{-5}$	$9{,}9908 \cdot 10^{-6}$	$9{,}9351 \cdot 10^{-6}$
$\Omega_{Polarização}$	1223,1	1679,8	1691	1600,8

Outro parâmetro que pode ser calculado a partir do ensaio de polarização é a eficiência de proteção Pi (%), quantificada pela equação [103]:

$$Pi\ (\%) = \left[1 - \frac{i_{corr}}{i_{corr}^{0}}\right] * 100 \quad (2)$$

Onde i_{corr} é a densidade da corrente de corrosão do revestimento e i_{corr}^{0}é a densidade de corrente do substrato, os valores estão indicados na Tabela 15.

Tabela 15: Eficiências de proteção.

Eficiência de Proteção - Pi (%)	
Como Recebido	14,59
Intermediário	14,75
Fino	20,21

Os resultados apontam um incremento na proteção anticorrosiva entre 14 e 20%, em relação ao substrato, para os níveis de acabamento superficial.

Na Figura 50 é vista a macro das superfícies dos corpos-de-prova após o ensaio de corrosão.



Figura 50: Corpos-de-prova após o ensaio de corrosão.

4- Conclusões

Este trabalho, que teve como objetivo analisar a influência do acabamento superficial no comportamento ao desgaste erosivo e corrosivo de um revestimento metálico de Fe-Cr-B-Mn, aspergido termicamente pelo processo de arco elétrico e submetido à usinagem por retífica, permitiu as seguintes conclusões:

O revestimento de Fe-Cr-B-Mn-Si apresentou características típicas de revestimentos metálicos pulverizados por arco elétrico, como partículas parcialmente fundidas, óxidos, trincas e porosidades. A presença de poros e trincas interconectadas pode reduzir a efetividade da camada aspergida protetora e é um parâmetro a ser observado.

O ensaio de rugosidade superficial apresentou valores de R_a para a amostra com acabamento como aspergido próximos, o denotando a uniformidade do depósito e morfologia na superfície. Os valores de R_a encontrados para as amostras retificadas, se mostraram sem uniformidade a cada medida, havendo valores mais altos ou mais baixos a cada direção. Segundo a literatura, tais valores são característicos de materiais cujo modo de arrancamento é o de mecanismo frágil, ou seja, pela presença de defeitos e microfissuras a rugosidade mostrou-se independente da direção de medições.
O uso da solução de colocar todo o material abrasivo em um recipiente exterior à cabine de jateamento e movimentar a mangueira de sucção manualmente mostrou-se eficiente e reduziu muito (sem eliminar completamente) os eventos de paradas do jato por entupimentos. Inclusive, em mais de uma tentativa foi possível obter resultados homogêneos da taxa de erosão.

A análise semiquantitativa por EDS mostrou que o desgaste erosivo do revestimento, causado pelo jateamento abrasivo, não foi suficiente para expor o substrato, tanto na condição como recebido, quanto nas condições com acabamento superficial.

O acabamento superficial, para o conjunto de amostras estudadas, aspergidas com o processo a arco elétrico manual, com retífica em dois níveis de acabamento superficial e com o processo de jateamento erosivo como apresentado neste trabalho, não foi relevante para aprimorar a resistência ao desgaste erosivo. Contudo, o acabamento superficial permitiu aprimorar a proteção anticorrosiva do revestimento, eficiência na ordem de 14% a 20%.

À luz do estudado, conclui-se que os resultados obtidos são encorajadores, pois contribuem para a ampliação do conhecimento acerca de características de um revestimento proposto para a proteção de tubulações de caldeiras em usinas termelétricas a carvão mineral. Esse revestimento se mostrou eficaz para mitigar os danos causados pela erosão de partículas de cinza oriundas da combustão, que podem ou não estar associadas à corrosão. Com isso, os dados obtidos sustentam a viabilidade desse material como uma alternativa promissora para revestimento de proteção na condição como revestido, ou seja, sem nenhum acabamento superficial por usinagem, fato interessante para a indústria, pois evita procedimentos que além de elevar os custos da manutenção, considerando os valores de transporte e da retífica, ainda aumentariam o tempo de parada da caldeira.

4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Avaliação da Resistência à Corrosão do revestimento de Fe-Cr-B-Mn-Si sob a ação de H_2SO_4 em altas temperaturas.
- Análise da influência do acabamento superficial feito por eletro erosão no desgaste erosivo simulando ataque de cinzas volantes de revestimentos de Fe-Cr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica.
- Análise microestrutural, de resistência ao desgaste erosivo e à corrosão do revestimento Fe-Cr-B-Mn-Si obtido por cladeamento a laser.
- Estudo da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos de Fe-Cr-B-Mn-Si obtidos por aspersão térmica;
- Estudo da resistência à corrosão do revestimento Fe-Cr-B-Mn-Si, com o uso de selantes, fora do contexto de desgaste erosivo.

Referências

[1] LIMA, Maria Thereza da Silva Lopes; DE SOUZA, Marina Corrêa. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 2, p. 17-23, 2015.

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil); **Sistema de Informações de Geração**: Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9 - Acesso em: 23/02/2021.

[3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil); **Sistema de Informações de Geração**: Matriz de Energia Elétrica por Origem de Combustível. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9 - Acesso em: 23/02/2021.

[4] Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL. Disponível em: https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=45374c61bd3e40e3a484878003fae937. Acessado em 08/12/2019.

[5] TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. Rio de Janeiro: EPE, p. 25, 2016.

[6] WHEELDON, J. M.; THIMSEN, D. Economic evaluation of Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) power generation plants. In: **Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification**. Woodhead Publishing, 2013. p. 620-638.

[7] KUMAR, Santosh; KUMAR, Manoj; HANDA, Amit. Comparative study of high temperature oxidation behavior and mechanical properties of wire arc sprayed NiCr and NiAl coatings. **Engineering Failure Analysis**, v. 106, p. 104173, 2019.

[8] ARJUNWADKAR, Anand; BASU, Prabir; ACHARYA, Bishnu. A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers. Applied Thermal Engineering, v. 102, p. 672-694, 2016.

[9] SZYMANSKI, K.; HERNAS, A.; MOSKAL, G.; MYALSKA, H. Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for powerplant boilers – A review. **Surface & Coatings Technology**. Katowice, Polland, v.268, p.153-164, 2015.

[10] SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G.; DE BÖER, S. C.; SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G. O.; RAMOS, C. G. Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Unilasalle e Colpemi Mineração, 2011. 15p. Artigo Técnico.

[11] ZHIMIN, Zheng *et al.* A novel method used to study growth of ash deposition and in situ measurement of effective thermal conductivity of ash deposit. Heat Transfer—Asian Research, v. 47, n. 2, p. 271-285, 2018.

[12] GAO, Qi *et al.* Mechanism on the contribution of coal/char fragmentation to fly ash formation during pulverized coal combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 37, n. 3, p. 2831-2839, 2019.

[13] POZZOBON, Cristina Eliza *et al.* Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda. 1999.

[14] American Society for Testing and Materials, ASTM C618-15, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, West Conshohocken, PA, 2015.

[15] XAVIER, M. F. (2016), “avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza.

[16] GOODARZI, F. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants. **Environmental Study Group**, Earth Science Sector-Calgary Division, Natural Resources Canada, Fuel 85 (2006) 1418–1427.

[17] TAYLOR, W. E. Correlation of the Mohs's scale of hardness with the Vickers' s hardness numbers. C.B.E., F.R.M.S., F. Inst. P. Messers. Cooke, Troughton & Simms, Ltd., York. 1949.

[18] DAVIS, J. R. ASM Specialty Handbook Cast Irons, ASM International, **The Materials Information Society**, 1996.

[19] SCHAEFFER, L. et al.Obtenção de cermets por metalurgia do pó convencional a partir da utilização das cinzas da queima de carvão mineral, Contribuição técnica ao **68º Congresso Anual da ABM** - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

[21] GAO, Qi *et al.* A general mechanistic model of fly ash formation during pulverized coal combustion. **Combustion and flame**, v. 200, p. 374-386, 2019.

[22] GOMES, D. L. Caracterização de cinzas leves e de revestimento para caldeiras de central termelétrica brasileira. 2018. 92 f. Anais do **XX ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e VIII ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais**, Nova Friburgo, RJ – 16 a 19 outubro 2017.

[23] HUTTUNEN-SAARIVIRTA, E. *et al.* Influence of particle impact conditions and temperature on erosion–oxidation of steels at elevated temperatures. **Wear**, v. 272, n. 1, p. 159-175, 2011.

[24] ZARAGOZA-GRANADOS, J. *et al.* Erosion behaviour of AISI 310 stainless steel at 450° C under turbulent swirling impinging jets. **Wear**, v. 426, p. 637-642, 2019.

[25] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 304–306. 2014.

[26] MISHRA, S. B.; PRAKASH, S. Erosion–corrosion behaviour of Ni–20Cr plasma coating in actual boiler environment. **Surface Engineering**, v. 31, n. 1, p. 29-38, 2015.

[27] WANG, Heyang; ZHANG, Chaoqun; LIU, Xin. Heat transfer calculation methods in three-dimensional CFD model for pulverized coal-fired boilers. **Applied Thermal Engineering**, v. 166, p. 114633, 2020.

[28] EPRI. **Guideline for Welding Creep Strenght-Enhanced Ferrite Alloys.** Palo Alto. 2007.

[29] COSTA, R. C. Desenvolvimento de Novos Revestimentos por Aspersão Térmica à Arco para Proteção contra Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases. 2012.

[30] SINGH, Prashant Kumar; MISHRA, S. B. Erosion behaviour of boiler component materials at room temperature and 400° C temperature. **Materials Research Express**, v. 7, n. 1, p. 016538, 2020.

[31] MARTINS, B.R.; KEJELIN, N.Z. Estudo do Desempenho de Revestimentos Metálicos Depositados pelo Processo de Aspersão Térmica à Arco em Relação ao Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases. Florianópolis: Faculdade SATC e Tractebel Energia, 2012. 25p. Artigo Técnico.

[32] SINGH, Gurdeep; KUMAR, Santosh; KUMAR, Rakesh. Comparative study of hot corrosion behavior of thermal sprayed alumina and titanium oxide reinforced alumina coatings on boiler steel. **Materials Research Express**, v. 7, n. 2, p. 026527, 2020.

[33] GWEBU, Excellent Z.; ROUSSEAU, Pieter G. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A PROCESS MODEL FOR A SUPERHEATER HEAT EXCHANGER IN A COAL-FIRED POWER PLANT BOILER. In: International Heat Transfer Conference Digital Library. Begel House Inc., 2018.

[34] YURY, Korobov *et al.* Arc-Sprayed Fe-based coatings from cored wires for wear and corrosion protection in power engineering. **Coatings**, v. 8, n. 2, p. 71, 2018.

[35] LI, Tianchen *et al.* Microstructure and wear behavior of FeCoCrNiMo0. 2 high entropy coatings prepared by air plasma spray and the high velocity oxy-fuel spray processes. **Coatings**, v. 7, n. 9, p. 151, 2017.

[36] HOOP, P. J.; ALLEN, C. The high temperature erosion of commercial thermally sprayed metallic and cermet coatings by solid particles. **Wear**, v. 233, p. 334-341, 1999.

[37] HASSANI, S. *et al.* Impact stress absorption and load spreading in multi-layered erosion-resistant coatings. **Wear**, v. 268, n. 5-6, p. 770-776, 2010.].

[38] ZINE, Pankaj U.; JOSHI, Purva K. Inducing compressive residual stress to minimize effect of crack generation by using controlled shot peening process. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 870-877, 2023.

[39] FAUCHAIS, Pierre L.; HEBERLEIN, Joachim VR; BOULOS, Maher I. Overview of thermal spray. In: Thermal spray fundamentals. Springer, Boston, MA, 2014. p. 17-72.

[40] YIN, Shuo *et al.* Thermal Spray Technology. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, 2019.

[41] DAVIS, Joseph R. *et al.* (Ed.). **Handbook of thermal spray technology.** ASM international, 2004.

[42] MONTANI, U.R.S, **Quantificação de defeitos por processamento digital de imagens em revestimentos obtidos por aspersão térmica**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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

[44] KUMAR, R.; KUMAR, R.; KUMAR, S. Erosion corrosion study of HVOF sprayed thermal sprayed coating on boiler tubes: a review. **IJSMS**, v. 1, n. 3, p. 1-6, 2018.

[45] DORFMAN, M.R.: Thermal Spray - Processes. **Advanced Materials and Processes**. [S.l.]. v. 160, n.8, p.47, 2002.

[46] MENEZES, D.D.: Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pela Técnica de Arco Elétrico e Chama Convencional, em Meio Cloreto. 2007. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

[47] MONTANI, Uirá Rodrigues da Silveira *et al.* Analysis of surface finish influence on erosive wear resistance of Fe-Cr-B-Mn coatings in boiler tubes exposed to fly ash. **The**

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 133, n. 9, p. 4999-5009, 2024.

[48] MARQUES, P. V.: **Aspersão Térmica**. 2003. 16 f. – Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, 2003.

[49] LIMA, Carlos C.; TREVISAN, Roseana. Aspersão térmica: fundamentos e aplicações. **Artliber Editora, São Paulo, Brasil**, 2007.

[50] AMIN, Sagar; PANCHAL, Hemant. A review on thermal spray coating processes. **transfer**, v. 2, n. 4, 2016.

[51] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 8501-1:1988: Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Cleanliness*. 1988.

[52] COSTA, R. C. C.; DACOREGGIO M. V.; KEJELIN N. Z., COMELI F. W.: **Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica a Arco: uma Aplicação em Trocadores de Calor**.

[53] REGIS JR, O. **Viabilidade dos revestimentos anticorrosivos com Nb2O5/Cu, Nb2O5/Ni e Nb2O5/Al aplicados por aspersão térmica para estruturas enterradas de linhas de transmissão**. 2011. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado– Universidade Federal do Paraná, 2011, 221p.

[54] CORTÉS, R.S.*,* **Estudos de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha***.* 1998. Paginação Irregular. Tese (Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina). Florianópolis, SC, Brasil. 1998.

[55] KREPSKI, R. E. Thermal Spray Coating Application in Chemical Process Industries", MAT, St. **Louis, USA**, 1993.

[56] MARANHO, Ossimar: **Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). São Paulo, SP. 2006.

[57] HAUER, Michél *et al.* Variation of Heat Input and Its Influence on Residual Stresses and Coating Properties in Arc Spraying with Different Gas Mixtures. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 28, n. 1-2, p. 40-52, 2019.

[58] HAUER, Michél *et al.* Highly Efficient Thermal Barrier Coatings Based on Arc Spraying of Amorphous Fe-based Alloys and NiCrAlY for Use in LH2 Tanks and Other

Cryogenic Environments. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 32, n. 2-3, p. 327-338, 2023.

[59] VREIJLING M. P. W. **Electrochemical Characterisation of Metallic Thermaly Sprayed Coatings**. 1998. 158 f. Tese (Ph. D – TNO Institute of Industrial Technology). Netherlands. 1998.

[60] NGUYEN, Van Tuan *et al.* Arc Thermal Spray NiCr20 Alloy Coating: Fabrication, Sealant, Heat Treatment, Wear, and Corrosion Resistances. **International Journal of Electrochemistry**, v. 2019, 2019.

[61] ODHIAMBO, John Gerald *et al.* Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings. **Coatings**, v. 9, n. 7, p. 460, 2019.

[62] FALS, Hipólito Carvajal *et al.* Abrasive Wear Behavior of Fe-Based Amorphous/Nanocrystalline Coatings Deposited by High-Velocity Oxygen Fuel and Wire Arc Spray. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 32, n. 5, p. 2455-2462, 2023.

[63] W.J. Head, M.E. Haar, The development of a model to predict the erosion of materials by natural contaminants, **Wear** 15 (1970) 1–46

[64] KOT, Marcin *et al.* Analiza wpływu grubości warstw składowych na deformacje i pękanie powłok wielowarstwowych Ti/TiN. **Tribologia**, n. 4, p. 181-189, 2010.

[65] BURNETT, Philip J.; RICKERBY, D. S. The mechanical properties of wear-resistant coatings: II: Experimental studies and interpretation of hardness. **Thin solid films**, v. 148, n. 1, p. 51-65, 1987.

[66] HALDAR, Barun *et al.* Abrasive jet system and its various applications in abrasive jet machining, erosion testing, shot-peening, and fast cleaning. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 5, p. 13061-13068, 2018.

[67] NGUYEN, V. B. *et al.* Effect of air-borne particle–particle interaction on materials erosion. **Wear**, v. 322, p. 17-31, 2015.

[68] BOCCHINI, G. F. The influences of porosity on the characteristics of sintered materials. **SAE transactions**, p. 790-805, 1986.

[69] CHEN, Q.; LI, D. Y.; COOK, Bruce. Is porosity always detrimental to the wear resistance of materials? - A computational study on the effect of porosity on erosive wear of TiC/Cu composites. **Wear**, v. 267, n. 5-8, p. 1153-1159, 2009.

[70] CAMPOS, Pamella Kesseler de *et al.* Determination of the Metallic Coating Properties Obtained by Thermal Spraying and Analysis of its Influence on the Heat Transfer Efficiency in the Thermoelectric Power Plant Boiler Tubes. **Soldagem & Inspeção**, v. 27, 2022.

[71] MORE, Satish R.; BHATT, Dhananjay V.; MENGHANI, Jyoti V. Recent research status on erosion wear–an overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 257-266, 2017.

[72] WOOD, R. J. K. The sand erosion performance of coatings. **Materials & design**, v. 20, n. 4, p. 179-191, 1999.

[73] ABEDINI, Morteza *et al.* Influence of surface finishing by grinding on the cavitation erosion resistance of 316L and NiAl-bronze. **Wear**, p. 205432, 2024.

[74] MAHARAJAN, S. *et al.* Erosive and corrosive wear performance and characterization studies of plasma-sprayed WC/Cr3C2 coating on SS316. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 19, n. 5, p. 2845-2861, 2022.

[75] DĂNĂILĂ, Eliza; BENEA, Lidia. The effect of surface roughness on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in saliva solution. In: **2015 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)**. IEEE, 2015. p. 1-4.

[76] ZUO, Yu; WANG, Haitao; XIONG, Jinping. The aspect ratio of surface grooves and metastable pitting of stainless steel. **Corrosion Science**, v. 44, n. 1, p. 25-35, 2002.

[77] ABOSRRA, L. *et al.* Corrosion of mild steel and 316L austenitic stainless steel with different surface roughness in sodium chloride saline solutions. **WIT Transactions on Engineering Science, pp. 161 – 172.**

[78] SUTER, Thomas *et al.* Microelectrochemical studies of pit initiation on high purity and ultra high purity aluminum. **Advanced Engineering Materials**, v. 7, n. 5, p. 339-348, 2005.

[79] American Society for Testing and Materials. ASTM A-178: standard specification for electric-resistance-welded carbon steel and carbon-manganese steel boiler and superheater tubes. West Conshohocken: ASTM; 2012.

[80] ISO, BSEN. 8504-2: 2001, BS 7079-D2: 2000 Preparation of steel substrates before application of paints and related products. **Surface preparation methods. Abrasive blast cleaning**.

[81] DAS, Purnendu; BANDYOPADHYAY, ParthaPratim; PAUL, Soumitra. Finish form grinding of thermally sprayed nano-structured coatings. **Advances in Materials and Processing Technologies**, v. 5, n. 1, p. 39-52, 2019.

[82] HUO, Yanhao *et al.* Surface/subsurface damage mechanisms and inhibition strategies in machining of hard and brittle materials: a systematic review. **Surfaces and Interfaces**, p. 105088, 2024.

[83] ASTM G76-04. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets. 2004.

[84] ASTM G61-86 (Reapproved 2009), Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

[85] BASSAM, Seyed Navid *et al.* Antibacterial and Virucidal Evaluation of Ultrafine Wire Arc Sprayed German Silver Coatings. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 32, n. 4, p. 959-969, 2023.

[86] LIU, Xianbing; ZHANG, Bi; DENG, Zhaohui. Grinding of nanostructured ceramic coatings: surface observations and material removal mechanisms. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 15, p. 1665-1676, 2002.

[87] KUMAR, Manoj; KANT, Shashi; KUMAR, Santosh. Corrosion behavior of wire arc sprayed Ni-based coatings in extreme environment. **Materials Research Express**, v. 6, n. 10, p. 106427, 2019.

[88] NIE, Hongying *et al.* Study on the wear resistance and mechanism of HVOF-sprayed WC10Co4Cr coatings. **Surface and Coatings Technology**, p. 131368, 2024.

[89] MUELLER, Sebastian *et al.* Material removal mechanisms in grinding of two-phase brittle materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1, p. 287-298, 2018.

[90] MANEA, Hisham *et al.* Micro-Grinding Parameter Control of Hard and Brittle Materials Based on Kinematic Analysis of Material Removal. **Mathematics**, v. 12, n. 10, p. 1589, 2024.

[91] KANT, Shashi *et al.* Study of High Temperature Oxidation Behavior of Wire Arc Sprayed Coatings. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 1741-1748, 2020.

[92] ARIF, Zia Ullah *et al.* Effect of spraying parameters on surface roughness, deposition efficiency, and microstructure of electric arc sprayed brass coating. 2020.

[93] MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 5 ed. JOHN WILEY & SONS, INC, Arizona State University, p. 21-125, 2001.

[94] MURTHY, J. K. N.; RAO, D. S.; VENKATARAMAN, B. Effect of grinding on the erosion behaviour of a WC–Co–Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes. **Wear**, v. 249, n. 7, p. 592-600, 2001.

[95] ZOEI, Maedeh Sadat; SADEGHI, Mohammad Hosein; SALEHI, Mehdi. Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC–10Co–4Cr coating. **Surface and Coatings Technology**, v. 307, p. 886-891, 2016.

[96] FINNIE, Iain. Some reflections on the past and future of erosion. Wear, v. 186, p. 1-10, 1995.

[97] KULU, Pritt; TARBE, Riho; VALLIKIVI, Ahto. Abrasive wear of powder materials and coatings. Materials Science, v. 11, n. 3, p. 230-234, 2005.

[98] The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials

[99] JI, Xiulin et al. Erosive wear resistance evaluation with the hardness after strain-hardening and its application for a high-entropy alloy. Wear, v. 398, p. 178-182, 2018.

[100] ROJAS-MOLANO, Héctor F. *et al.* Effect of the Surface Chemical Composition on the Corrosion Resistance in the Mixture of FeCrMoNbB (140MXC) and FeCMnSi (530AS) Coatings Produced with the Electric Wire Arc Spraying Technique: Part I. Materials, v. 16, n. 11, p. 4182, 2023.

[101] NIRANATLUMPONG, Panadda; KOIPRASERT, Hathaipat. Improved corrosion resistance of thermally sprayed coating via surface grinding and electroplating techniques. Surface and Coatings Technology, v. 201, n. 3-4, p. 737-743, 2006.

[102] LIN, Jinran *et al.* Microstructure and corrosion resistance of Fe-based coatings prepared by twin wires arc spraying process. **Journal of thermal spray technology**, v. 23, p. 333-339, 2014.

[103] BOUDJIT, Sarra *et al.* Mechanical, Tribological, and Electrochemical Evaluation of NiCrAlMoFe Thermally Sprayed Coatings Subject to Post-treatments. Journal of Materials Engineering and Performance, p. 1-14, 2024.