



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

WILTON BATISTA DA SILVA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE PÓS DE METAL DURO WC-Co E Cr₃C₂-NiCr ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA EM COMPONENTES DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PLANTAS QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS

Recife
2025

WILTON BATISTA DA SILVA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE PÓS DE METAL DURO WC-Co E Cr₃C₂-NiCr ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA EM COMPONENTES DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PLANTAS QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho

Recife

2025

UFPE - Biblioteca Central

Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE -

Silva, Wilton Batista da.

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE PÓS DE METAL DURO WC-Co E Cr₃C₂-NiCr ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA EM COMPONENTES DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PLANTAS QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS / Wilton Batista da Silva. - Recife, 2025.

132f.: il.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, CTG, PPGEM.

Orientação: Oscar Olimpio de Araújo Filho.

Coorientação.

1. Desgaste; 2. Aspersao Térmica; 3. Corrosão. I. Filho, Oscar Olimpio de Araújo. II. . III. Título.

UFPE-

WILTON BATISTA DA SILVA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE PÓS DE METAL
DURO WC-Co E Cr₃C₂-NiCr ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA
EM COMPONENTES DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM PLANTAS
QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Franciné Alves da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esta tese especialmente à Deus por ter me dado força para seguir a diante, à minha esposa Swamy, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em cada etapa dessa jornada. Ao meu filho Lucas e meu netinho, Matteo e às pessoas que foram a base e a força dessa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Oscar, pela paciência e por ter aceitado esse meu desafio e as orientações nos momentos difíceis da realização desse trabalho.

Agradeço todas as dificuldades que enfrentei. Não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

À Deus acima de tudo, por me ter dado saúde para seguir forte para conclusão desse trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco - UFPE;

Ao Centro de Tecnologia e Geociências – CTG / UFPE;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE;

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação – PROPESQI / UFPE e ao CNPq pelo apoio às pesquisas desenvolvidas durante estes anos que estive no programa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM/UFPE, em especial a Luana e Jorge pela paciência e orientações durante todo esse período em que estive vinculado ao programa.

Ao Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural – COMPOLAB, pelo apoio no ensaio de corrosão eletroquímica e ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais – INTM, na pessoa do Prof. Dr. Thiago Felipe, pelo apoio do uso dos laboratórios.

Aos amigos e técnicos de laboratório, Janaína Cirino, Ivaldo Dantas e Rubens Andrade pelos ensaios realizados e por sempre fazerem o possível para estarem disponíveis para me ajudar quando os solicitei.

Ao meu orientador, professor Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho, por ter aceitado o desafio de ser meu orientador durante essa minha jornada.

Aos professores Dr. Franciné Alves da Costa (UFRN), Dr. Edval Gonçalves de Araújo, Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves e Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (UFPE) por terem aceitado participar da banca de defesa e pelas orientações no sentido de melhoria da escrita da minha tese.

E por fim, agradeço a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para essa conquista.

RESUMO

O presente estudo investigou alternativas para ampliar a vida útil de componentes de máquinas e equipamentos, por meio da aplicação de revestimentos por aspersão térmica a preços competitivos. Foram analisadas as performances dos revestimentos de duas misturas de metal duro (WC-Co) + carbeto de cromo - NiCr (Cr_3C_2 – NiCr) denominada como M1, nas proporções 75% / 25% e mistura M2 nas proporções 50% / 50%. Amostras foram revestidas com essas duas misturas (M1 e M2) pelo processo HVOF, para obtenção de dados experimentais e caracterizadas por Microscopia Óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), Microdureza Vickers, Porosidade, Adesividade e Corrosão Eletroquímica. Os resultados indicaram baixa dispersão nas propriedades analisadas dos revestimentos obtidos das misturas M1 e M2. Desta forma recomendou-se o revestimento da mistura M2 por apresentar custo total de aplicação 30% inferior ao revestimento da mistura M1. Com base desses resultados experimentais, foram realizadas aplicações em componentes de equipamentos de duas empresas parceiras: Na empresa 1, foi revestido dois êmbolos de bomba alternativa e na empresa 2, uma placa de vedação e um corpo espiral. A avaliação dos revestimentos foi feita pelo índice de desempenho “Tempo Médio Entre Falhas – TMEF”. Os êmbolos revestidos da empresa 1, apresentaram desgaste prematuro em 30 dias de operação contínua. A baixa eficiência provocada pela falha prematura não representa necessariamente uma ineficiência do revestimento em si, pois existem fatores operacionais que podem ter contribuído para a baixa eficiência do revestimento. Por outro lado, a placa de vedação e o corpo espiral da bomba da empresa 2, se mantiveram em operação por quase um ano sem a necessidade de substituição, evidenciando a viabilidade da aplicação desses revestimentos, como melhoria localizada e recomposição dimensional, pois esses componentes seriam substituídos por novos e descartados como sucatas.

Palavras-chave: Aspersão Térmica; Revestimentos; Desgaste; Corrosão; HVOF.

ABSTRACT

This study investigated alternatives for extending the service life of machine components through the application of competitively priced thermal spray coatings. The performance of two tungsten carbide-cobalt + chromium carbide-nickel chromium (WC-Co/Cr₃C₂-NiCr) composite coatings was evaluated: a 75%/25% blend (designated M1) and a 50%/50% blend (designated M2). Coatings were deposited via the High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) process. The resulting coatings were characterized using Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Vickers Microhardness testing, porosity analysis, adhesion testing, and electrochemical corrosion testing.

The results indicated low dispersion in the analyzed properties for both coating compositions. Based on a total application cost that was 30% lower than that of coating M1, the M2 coating was selected for industrial validation. Field trials were conducted on components from two partner companies: two plungers from a reciprocating pump (Company 1) and one seal plate and one spiral volute (Company 2). Coating performance was assessed using the Mean Time Between Failures (MTBF) metric.

The coated plungers from Company 1 exhibited premature wear after 30 days of continuous operation. It is posited that this low efficiency and premature failure may not be attributable to an inherent inefficiency of the coating itself but rather to operational factors that could have compromised coating performance. Conversely, the coated seal plate and spiral volute from Company 2 remained in operation for nearly one year without requiring replacement. This outcome demonstrates the technical and economic viability of employing these HVOF-sprayed coatings for targeted component improvement and dimensional restoration, effectively diverting components that would otherwise be discarded as scrap from the waste stream.

Keywords: Thermal Spray; Coating; Wear; Corrosion, HVOF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de deposição das partículas pelo processo da aspersão térmica	19
Figura 2 – Processo da aspersão térmica.....	20
Figura 3 – Secção transversal da estrutura de um revestimento por aspersão térmica	21
Figura 4 – Classificação dos processos de aspersão térmica	23
Figura 5 – Velocidade média das partículas conforme processo aspersão térmica..	24
Figura 6 – Esquema de aplicação aspersão térmica pelo processo HVOF	27
Figura 7 – Pistola/tocha utilizada para aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF	27
Figura 8 – Representação esquemática, antes e após a preparação da superfície por meio de ferramentas mecânicas	34
Figura 9 – Representação esquemática da eficiência do jateamento abrasivo	34
Figuras 10 (a) e 10 (b) – Diferença entre os processos de limpeza química e mecânica	35
Figura 11 – Picos e vales de três superfícies diferentes	36
Figura 12 – Influência do ângulo de jateamento de uma liga de alumínio e aço carbono	37
Figura 13 – Influência do ângulo de jateamento na obtenção da rugosidade de aços com diferentes durezas	38
Figura 14 – Variação da rugosidade em função do tempo de jateamento	38
Figura 15 – Resíduo na superfície em função do tamanho do abrasivo (%).....	39
Figura 16 – Componentes de bombas (luvas e corpo espiral) que foram recuperadas suas dimensões originais por aspersão térmica.....	41
Figura 17 – Dispositivo de compensação recomendado para realização do ensaio de adesividade segundo a norma ASTM C633-R21	45
Figura 18 – Tipos de fraturas resultantes do teste de adesividade	46
Figura 19 – Imagens padrão método A de comparação direta da porosidade em revestimentos	49
Figura 20 – Imagens padrão método A de comparação direta da porosidade em revestimentos -continuação.....	50
Figura 21 – Imagem de uma microscopia eletrônica da superfície de uma amostra revestida por aspersão térmica de uma liga Ni/Al	51
Figura 22 – Principais processos de desgaste	53
Figura 23 – Diferentes tipos de desgaste e ocorrência (%).....	54
Figura 24 – Desgaste abrasivo dois corpos (a) e Desgaste abrasivo três corpos (b)	54
Figura 25 – Desgaste abrasivo riscamento (a) e desgaste abrasivo rolamento (b)...	55

Figura 26 – Desenho esquemático do abrasômetro conforme ASTM G65-16	55
Figura 27 - Etapas da realização ensaio de desgaste abrasivo	57
Figura 28 – Equipamento para realização de ensaio corrosão por névoa salina	60
Figura 29 – Esquema para o ensaio do Potencióstato	63
Figura 30 – Curva de polarização anódica (Ia) e catódica (Ic)	64
Figura 31 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	66
Figura 32 – Êmbolo de uma bomba deslocamento positivo tipo alternativa.....	67
Figura 33 – Espelho e corpo espiral (Voluta) de bomba centrífuga que foram revestidos com as misturas de carbetas M1 e M2	68
Figura 34 – Misturador em V para homogeneização das misturas M1 e M2	68
Figura 35 – MEV com EDS da mistura M1 contendo (WC-Co) + (Cr ₃ C ₂ – NiCr)	69
Figura 36 – MEV com EDS da mistura M2 contendo (WC-Co) + (Cr ₃ C ₂ – NiCr)	70
Figuras 37(a) e 37(b) - Medições dos tamanhos das partículas dos pós das misturas M1 e M2	70
Figura 38 – Dimensões das amostras não revestidas para o ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65/91	71
Figuras 39(a) e 39(b) – Dimensões das amostras não revestidas para o ensaio de adesividade conforme a norma ASTM C633-13R21	72
Figuras 40(a) e 40(b) – Dispositivos utilizados para fixação das amostras a serem revestidas.....	72
Figura 41 - Aplicação dos revestimentos nas amostras, das misturas M1 e M2 (WC-Co+Cr ₃ C ₂ -NiCr) pelo processo HVOF	74
Figura 42 – Imagem da pistola/tocha utilizada na aplicação dos revestimentos por aspersão térmica através do processo HVOF	75
Figura 43 – Painel de controle das variáveis do processo HVOF (oxigênio, combustível e gás de arraste).	75
Figura 44 – Amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2	76
Figura 45 – Imagem de um abrasômetro por roda de borracha para realização de ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65-16	77
Figura 46 – Amostras revestidas prontas para realização dos ensaios de desgaste abrasivo e adesividade.....	78
Figura 47 – Sequência da realização do ensaio de desgaste abrasivo.....	79
Figuras 48(a) e 48(b) – Imagem da máquina de tração montada com as amostras 48(a) e o dispositivo compensador conforme a norma ASTM C633-13R21 48(b) para a realização do ensaio adesividade	80
Figuras 49(a) e 49(b) - Adesivos utilizados na colagem das amostras para realização do ensaio de adesividade.....	81
Figura 50 – Dispositivo de apoio das amostras na etapa de colagem	82
Figura 51 – Detalhe do dispositivo de apoio das amostras na etapa de colagem.....	82

Figuras 52(a) e 52(b) – Microscopia Eletrônica de Varredura dos revestimentos, mostra os revestimentos das misturas M1 e M2, caracterizando os WC-Co e Cr ₃ C ₂ -NiCr.	84
Figura 53 – Imagem do mapeamento em linha das superfícies das amostras revestidas com as misturas M1 e M2	85
Figuras 54(a) e 54(b) – Imagens das medições das camadas revestidas (µm) das misturas M1 e M2.....	86
Figura 55 – Aplicação dos revestimentos por aspersão térmica através do processo manual	87
Figura 56 – A imagem mostra o monitoramento da temperatura durante a aplicação dos revestimentos em um êmbolo.....	88
Figura 57 – A imagem mostra a sequência de preparação dos êmbolos para a aplicação dos revestimentos.	88
Figura 58 – Imagem dos êmbolos revestidos por aspersão térmica para realização das medições da rugosidade.....	89
Figura 59 – Imagem da placa de vedação (espelho) antes do jateamento abrasivo e receber o revestimento.....	90
Figura 60 – Imagem da aplicação do revestimento na placa de vedação (espelho).90	
Figura 61 – Imagem da placa de vedação (espelho) após aplicação revestimento ..91	
Figura 62 – Equipamento para ensaio de microdureza Vickers	92
Figura 63 – Gráfico dos pontos das medições das identações revestimento M1	92
Figura 64 – Gráfico dos pontos das medições das identações revestimento M2.....	92
Figura 65 – Mapa das identações realizadas sobre a superfície do revestimento M1	93
Figura 66 – Mapa das identações realizadas sobre a superfície do revestimento M2	93
Figura 67 - Imagem da microscopia de seis identações realizadas na superfície da amostra revestida com a mistura M1	93
Figura 68 – Imagem da microscopia de seis identações realizadas na superfície da amostra revestida com a mistura M2	94
Figura 69 – Resultados das medidas de microdurezas de uma superfície revestida por aspersão térmica de uma mistura de pós M1	95
Figura 70 – Resultados das medidas de microdurezas de uma superfície revestida por aspersão térmica de uma mistura de pós M2.	95
Figura 71 – Valores médios das medições das microdureza nas amostras revestidas com pós das misturas M1 e M2.....	96
Figura 72 - Etapas para realização do ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65-16R21.....	97
Figura 73 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste abrasivo.	97
Figura 74 – Perda de volume das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após realização do ensaio (mm ³).	98

Figura 75 – Perda de massa das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após realização do ensaio (g)	98
Figura 76 – Resultados das tensões de ruptura do ensaio de adesividade por tração das amostras revestidas com os pós da mistura M1 (ASTM C633-13)..	99
Figura 77 – Resultados das tensões de ruptura do ensaio de adesividade por tração das amostras revestidas com os pós da mistura M2 (ASTM C633-13).	100
Figura 78 – Resultados das médias das tensões de rupturas do ensaio de adesividade.	100
Figura 79 - – Imagem das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após ensaio de adesividade por tração mostrando que a falha foi no adesivo.	101
Figura 80 – Imagem da região utilizada para determinação da porosidade da superfície revestida com os pós da mistura M1.	102
Figura 81 – Imagem da região utilizada para determinação da porosidade da superfície revestida com os pós da mistura M2.	102
Figura 82 – MEV da amostra do revestimento M1	103
Figura 83 – MEV da amostra do revestimento M2	103
Figura 84 – Curva de polarização potenciodinamica da amostra revestida com os pós da mistura M1 para determinação de I_{corr} por extração do trecho linear.	105
Figura 85 – Curva de polarização potenciodinamica da amostra revestida com os pós da mistura M2 para determinação de I_{corr} por extração do trecho linear.	106
Figura 86 - imagem de uma tabela para cálculo dos custos de aplicação de revestimentos por aspersão térmica.	109
Figura 87 – Imagem dos dois êmbolos revestidos com as misturas M1 e M2 sendo instalados na bomba para acompanhamento da performance.....	110
Figura 88 – Imagem dos dois êmbolos após 30 dias de operação, bomba parada devido ao vazamento.	111
Figura 89 – Imagem do êmbolo revestido com a mistura M2 em operação mostrando um vazando produto.....	111
Figura 90 – Imagem dos êmbolos removidos da bomba após 30 dias de operação contínua.....	112
Figura 91 – Placa de vedação (espelho) revestida com a mistura M1 e o corpo espiral (voluta) revestido com a mistura M2.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação da aspersão térmica por tipo de desgaste e material aplicado	25
Tabela 2 – Características entre os processos de aspersão térmica	28
Tabela 3 – Comparação entre os processos de aspersão térmica	29
Tabela 4 – Diferentes graus de corrosão	31
Tabela 5 – Grau de limpeza de superfícies metálicas	32
Tabela 6 – Procedimentos recomendados para o ensaio de desgaste abrasivo segundo a ASTM G65-16R21	56
Tabela 7 – Avaliação qualitativa da taxa de corrosão em aços utilizados em dutos de petróleo	61
Tabela 8 – Composição química dos materiais utilizados nos revestimentos (%)	67
Tabela 9 – Parâmetros de controle utilizado para aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF	74
Tabela 10 – Dimensões das amostras antes e após aplicação dos revestimentos...	83
Tabela 11 – Valores obtidos das taxas corrosão a partir do I_{corr} e E_{corr} convertidas em Taxa de Penetração (CR) e Perda de Massa (MR) no ensaio de corrosão eletroquímica – Tafel	106
Tabela 12 - Taxa de corrosão dos principais materiais metálicos aplicados ambientes agressivos	106
Tabela 13 - Comparativo das taxas de corrosão por penetração obtidas pela técnica eletroquímica em diversos aços	107

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

µm	Micrômetro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Associação Brasileira de Soldagem
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
APS	<i>Air Plasma Spraying</i>
ASM	<i>American Society Metals</i>
ASP	<i>Arc Spray Process</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BS	<i>British Standard</i>
EAS	<i>Electric Arc Spraying</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
FS	<i>Flame Spraying</i>
HVOF	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KN	Quilonewton
m/s	Metros por segundo
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
MPa	Megapascal
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
°C	Grau Celsius
PSI	<i>Pound Force per Square Inch</i>
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i>
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society Automotive Engineers</i>
SCFH	<i>Standard Cubic Feet per Hour</i>
SSPC	<i>Steel Structure Paint Council</i>
TSS	<i>Thermal Spray Society</i>
WC	Carboneto de Tungstênio (metal duro)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	17
SUMÁRIO	18
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 ASPERSÃO TÉRMICA	19
3.1.1 Processos de aspersão térmica	22
3.1.2 Aspersão pelo método HVOF	26
3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA REVESTIMENTOS	29
3.2.1 Limpeza	30
3.2.2 Texturização de superfícies	35
3.2.3 Camada de ligação	40
3.2.4 Preaquecimento do substrato	40
3.3 ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL	40
3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS.	42
3.4.1 Avaliação da adesividade dos revestimentos	43
3.4.2 Avaliação da porosidade nos revestimentos	47
3.4.3 Avaliação da dureza dos revestimentos	51
3.4.4 Avaliação do desgaste nos revestimentos.....	52
3.4.5 Conceito de corrosão e ensaios para avaliação da corrosão de peças revestidas	57
3.4.6 Ensaio de corrosão por névoa salina (Salt- spray).....	60
3.4.7 Ensaio corrosão eletroquímica	61

3.4.8 Técnica de extrapolação da curva de Tafel	63
4 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	66
4.1 MATERIAIS	66
4.1.1 Produção dos revestimentos.....	72
4.1.2 Metalografia dos revestimentos	76
4.1.3 Ensaio de Microdureza.....	76
4.1.4 Medição da porosidade dos revestimentos	77
4.1.5 Teste de desgaste abrasivo conforme norma ASTM G-65-16R21	77
4.1.6 Teste de adesividade.....	80
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DOS REVESTIMENTOS	84
5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS	91
5.3 DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS.....	96
5.4 ADERÊNCIAS DOS REVESTIMENTOS	98
5.5 POROSIDADE NOS REVESTIMENTOS.....	101
5.6 ENSAIO DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA.....	104
5.7 APLICAÇÃO DA ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL E MELHORIA DE ÁREAS LOCALIZADAS.	108
6 CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS.....	116
ANEXO A – CERTIFICADO DO MATERIAL CARBETO DE TUNGSTÊNIO WC+ 12CO (PÓ)	125
ANEXO B – CERTIFICADO DE CARBETO DE CROMO CR₃C₂ + 25NICR (PÓ)..	126
ANEXO C – CERTIFICADO DO MATERIAL SUBSTRATO AISI 1020 (BARRA CHATA E TARUGO)	127

1 INTRODUÇÃO

O desgaste, a corrosão e as avarias (trincas ou quebras) de peças/componentes de máquinas, podem levar a custos significativos em diferentes setores industriais. Nas Indústrias Químicas e Petroquímicas, por exemplo, os ambientes agressivos (água do mar, gases, areia, petróleo, alta temperatura e pressão...) e produtos utilizados nos processos, acarretam problemas de desgaste e corrosão em dutos de transporte de petróleo, ponteiras de risers¹, componentes internos de bombas, válvulas, eixos, luvas e outros. Neste tipo de situação, além dos custos oriundos da troca das peças e paradas não programadas da produção, os riscos de acidentes podem acarretar sérios problemas ambientais. Grandes desafios são requeridos nestes casos, principalmente no projeto, na fabricação e no desenvolvimento dos materiais de componentes submetidos a diferentes condições operacionais. Uma das alternativas para proteger componentes metálicos e não metálicos contra essas condições severas de operação é a aplicação de técnicas da Engenharia de Superfícies.

A Engenharia de Superfície abrange uma variedade de processos, ou tecnologias com finalidade de modificar propriedades superficiais de componentes metálicos ou não metálicos. Os diferentes processos existentes vêm sendo utilizados como uma alternativa a atender requisitos que possam aumentar o desempenho e a vida útil dos componentes/equipamentos. O principal objetivo é tornar superfícies técnicas mais resistentes ao desgaste ou corrosão, todavia podem também ter outros propósitos, como decorativos ou funcionais (atraito, refletividade, condutividade, hidrofobicidade, dentre outros).

As modificações podem ser decorrentes de tratamentos superficiais tais como: os tratamentos térmicos, termoquímicos e mecânicos por deformação, que adicionam poucas ou quase nenhuma massa à superfície, ou da aplicação de revestimentos que alteram as dimensões dos componentes numa escala micrométrica ou milimétrica. Coronado *et al.* (2009) relatou que o aumento de volume de carbonetos melhorou a resistência a abrasão. Em outro estudo, Singh e Prakash (2012) investigaram o comportamento de alta temperatura dos

¹ Risers- é um tubo que liga plataformas de petróleo e gás a linhas de produção submarinas.

revestimentos de Cr₃C₂-25(NiCr)/(WC-Co) pulverizado com HVOF em um substrato de aço ASTM AS 213-T22, obtendo o valor médio de dureza de 966 HV_{0,5}.

Os tratamentos térmicos, também aumentam a resistência ao desgaste abrasivo. Os tratamentos térmicos superficiais mais difundidos são os aplicados por laser, chama, indução e os tratamentos termoquímicos, onde podemos citar: cementação, nitretação, carbonitretação e boretação. Com relação aos revestimentos, destacam-se os recobrimentos eletrodepositados (cromo duro, galvanização e níquel químico), os filmes finos PVD e CVD (Deposição Física de Vapor e Deposição Química de Vapor) e os revestimentos duros ou “hardfacings” (revestimentos por solda, por aspersão térmica e *Laser cladding*). Tratamentos mecânicos de endurecimento de superfície, como *shot peening*, *laser shot peening* e rolamentos, são utilizados para induzir deformação elastoplástica na superfície para reduzir a porosidade oriunda das técnicas de revestimento por aspersão térmica (Zheng, 2022). Cada técnica de modificação superficial possui características e aplicações específicas, podendo ter sua utilização de forma isolada ou combinada. A aspersão térmica como uma das técnicas da engenharia de superfícies, permite depositar revestimentos espessos de materiais metálicos e não metálicos, podendo ser considerado como um método econômico para solução de problemas relacionado ao desgaste e a corrosão (Huang, 2019).

Bozza *et al.* (2021) utilizaram da aspersão térmica pelos métodos HVOF (*High Velocity Oxi-Fuel*) e HVAF (*High Velocity Air-Fuel*), para aplicação de carbeto de WCCrCo a fim de avaliar o desgaste erosivo por jato de lama (*slurry*), variando o ângulo de ataque, onde observaram que o método HVAF apresentou maior resistência a erosão.

Zaharaddeen *et al.* (2024) utilizaram das técnicas de aspersão térmica para reduzir a taxa de desgaste com uma liga de alta entropia denominada HEAs² (Al, Co, Cr, Fe, Ni, Si), acrescentando carbeto de tungstênio, variando de 0 a 40% em peso, em substrato de aço baixo carbono ASTM Q235 (tensão de escoamento 235 MPa), com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste.

As ligas HEAs apresentam alta resistência mecânica, dureza, resistência à corrosão e estabilidade térmica, entre outras.

² HEAs – liga metálica composta por pelo menos cinco elementos metálicos (por exemplo: Co, Cr, Fe, Mn, Ni) presentes em proporções aproximadamente iguais com base em suas razões molares.

Becker (2021), com o objetivo de reduzir o desgaste provocado pela cavitação e erosão por jato de lama, utilizou revestimentos binários de carbeto de tungstênio e cromo, em turbinas hidráulicas que ocasionava severos danos ao equipamento.

A fabricação de uma nova peça ou componente em substituição àquelas que sofreram algum tipo de degradação é na maioria das vezes mais onerosa. Uma alternativa atrativa nestes casos é a recuperação de peças através de aplicação de revestimentos com propriedades superior ao do substrato original. Esta opção é conhecida como recomposição dimensional de peças e pode minimizar os custos relativos à substituição delas, obtendo dessa forma uma excelente relação propriedades mecânicas versus custos. A princípio, todos os revestimentos podem ser utilizados como recomposição dimensional, sendo os recobrimentos os mais indicados para aplicações em condições de corrosão e os revestimentos duros para situações envolvendo desgaste/corrosão (Albertin, 2003).

Dentre os revestimentos duros, os obtidos pelo processo de aspersão térmica são os mais utilizados na atualidade, pois esse processo possibilita a aplicação de grandes quantidades de materiais e tipos de revestimentos, tais como os materiais cerâmicos ou compósitos. Outra característica da aspersão térmica é a de aplicar revestimentos nos mais variados tipos de substratos (material base), pois não ocorre alteração de forma ou microestrutura devido a baixas temperaturas a que são submetidos. Comparada com os processos de soldagem como revestimento, onde ocorrem modificações metalúrgicas na região da solda/substrato, a aspersão térmica pode ser considerada como uma técnica de revestimento basicamente a frio. Como consequência, é possível revestir peças de materiais de baixo ponto de fusão, como os termoplásticos e de alto ponto de fusão como os metais. Possibilidade de revestir peças/componentes no próprio local de trabalho, com pouca ou nenhuma desmontagem, principalmente quando estas são grandes e com geometria complexa. São inúmeras as aplicações dos revestimentos termicamente aspergidos, onde podem ser destacados a fabricação de componentes para as indústrias automotivas, petróleo, eletroeletrônica, geração de energia e aeroespacial. Por serem os processos mais utilizados nas indústrias, a primeira consideração na seleção de um tipo de revestimento, é determinar se um processo de soldagem ou metalização é preferido ou requerido. Como regra, os processos de soldagem são preferidos para revestimento quando se requer

espessura relativamente grossa com alta tensão de aderência entre revestimento e peça. Os processos de aspersão térmica, por outro lado, são preferidos para revestimentos de espessura fina e aplicação de camadas duras com deformação mínima da peça (Infosolda, 1997).

Diante das inúmeras opções de processos de revestimentos e materiais que podem ser aplicados, encontra-se o desafio da escolha de qual a melhor combinação revestimento/material e o processo mais adequado para cada situação de trabalho. Fatores como, custo/benefício, parâmetros de processamento e propriedades finais requeridas (dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, adesividade, acabamento) devem ser levados em consideração nesta escolha. As diferentes técnicas de caracterização dos revestimentos são essenciais para uma correta/adequada seleção do processo e do material a ser utilizado na fabricação de novas peças ou na recomposição dimensional (Lima; Trevisan, 2007).

As propriedades de um revestimento realizado pela técnica de aspersão térmica estão relacionadas diretamente da adesão da camada aspergida e o substrato, bem como da coesão das partículas depositadas. Outros fatores importantes que também influenciam as propriedades de um revestimento são a quantidade de defeitos presentes (trincas, poros, óxidos, etc...) (Trevisan *et al.*, 2000).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o desempenho de dois revestimentos com duas misturas distintas de metal duro (WC-Co) e carbeto de cromo-NiCr ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conseguir empresas parceiras que manipulam produtos agressivos para aplicar os revestimentos em componentes de equipamentos tais como: êmbolos, rotores, espelhos, luvas e volutas que tenham contatos com produtos agressivos;
- Melhorar as propriedades mecânicas dos componentes nas regiões localizadas em contato com produtos agressivos;
- Aumentar a vida útil dos componentes de equipamentos usados nas indústrias químicas e petroquímicas, a custos competitivos;
- Aplicar os revestimentos em componentes de equipamentos, tais como: bombas, compressores etc.;
- Avaliar os resultados através do MTBF (*Mean Time Between Failures*), ou seja, tempo médio entre falhas;
- Obter a taxa de corrosão dos revestimentos aplicados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

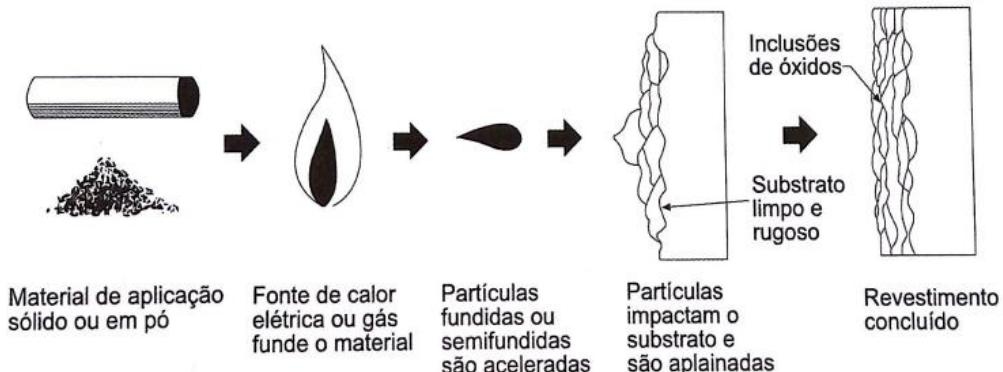
Neste capítulo são apresentadas as definições, tipos e características dos principais processos de aspersão térmica. Ele também aborda os principais cuidados com a preparação das superfícies antes do revestimento e os principais métodos de caracterização do mesmo, bem como conceitos sobre corrosão e seus principais tipos, além de apresentar um resumo das principais normas utilizadas para caracterização dos revestimentos aplicados.

3.1 ASPERSÃO TÉRMICA

A Sociedade Americana de Soldagem (AWS, 1985) define aspersão térmica, “*Thermal Spray*”, como sendo um grupo de processos nos quais se divide finamente materiais metálicos e não metálicos que são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato preparado.

O revestimento é formado pela deposição sucessiva de camadas de partículas que se achatam e solidificam, resultando em estrutura lamelar ou lenticular. Quando ocorre o impacto das partículas aquecidas e aceleradas sobre o substrato (devido a um gás de arraste), estas se achatam formando pequenas lamelas. Ao incidirem sobre o substrato elas resfriam-se e solidificam-se formando desta maneira o revestimento por aspersão térmica (figura 1).

Figura 1 – Esquema de deposição das partículas pelo processo da aspersão térmica

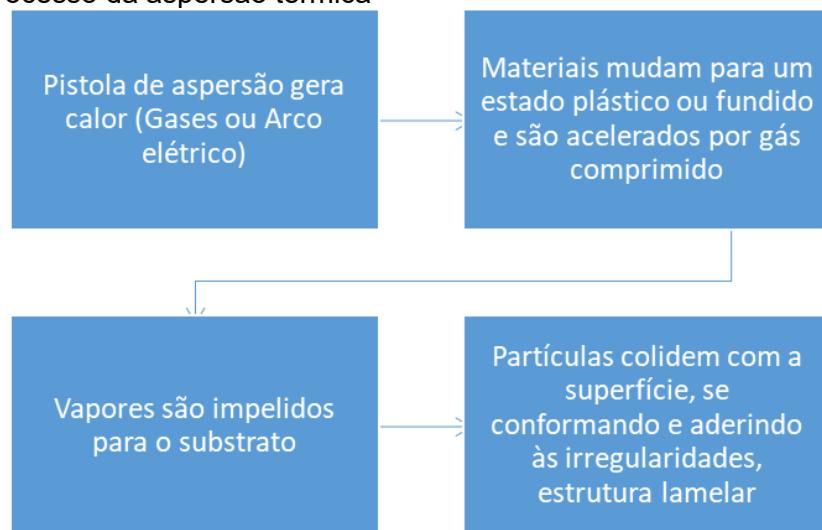


Fonte: Lima e Trevisan (2007).

Observa-se que a matéria prima utilizada para obtenção do revestimento pela técnica da aspersão térmica, consiste em um material geralmente, metálico, na forma de pó, vareta ou arame, onde ele é fundido através de uma fonte de calor

que pode ser de origem química (combustão) ou elétrica (arco elétrico), impulsionado por um ar comprimido ou outros gases, de preferência um gás inerte. A aderência ao substrato se dá por mecanismo de natureza mecânica, químico-metalúrgico e físico, dependendo da temperatura da fonte de calor e da velocidade imposta às partículas. Um resumo do processo do processo de aspersão pode ser verificado na figura 2.

Figura 2 – Processo da aspersão térmica



Fonte: O Autor (2025).

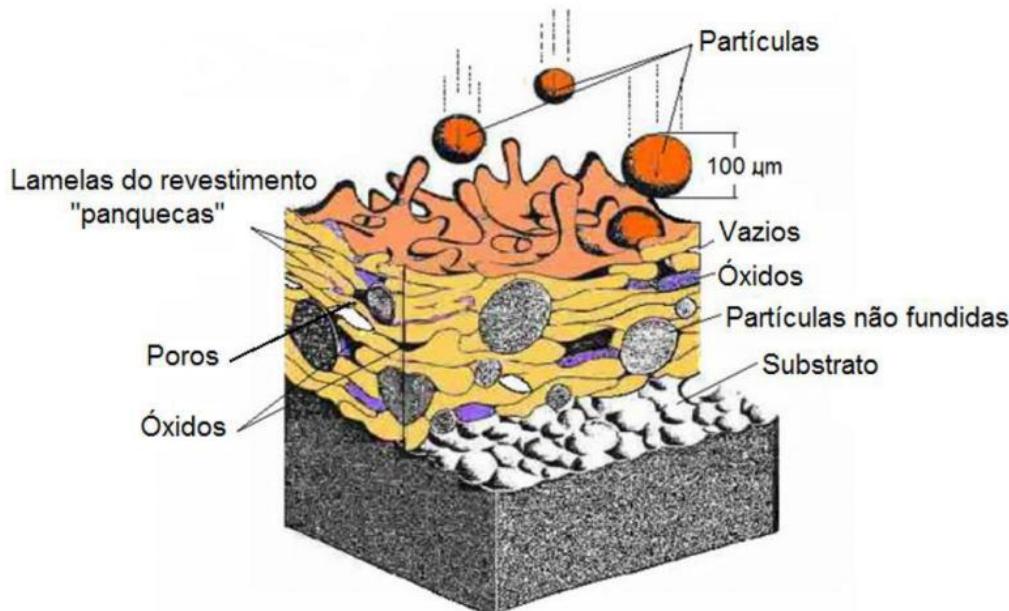
Os revestimentos aplicados pela aspersão térmica têm como principal objetivo a proteção de substratos contra desgaste abrasivo, erosivo e corrosivo bem como fadiga superficial (Maranho, 2006). Outra aplicação deste tipo de processo é servir como alternativa de recomposição dimensional de componentes que sofreram algum processo de desgaste ou degradação, garantindo, assim, a integridade dimensional do componente e adicionando a este uma melhoria na região aspergida, evitando a necessidade do consumo de recursos naturais ou de energia na fabricação de novos componentes.

A deposição por aspersão térmica pode ser realizada na maioria dos metais e suas ligas, em materiais cerâmicos, óxidos, vidros, madeira, entre outros, onde o material aspergado pode ser fornecido na forma de vareta, arame ou pó. A estrutura e a química do depósito aspergado são diferentes do material no seu estado original. Essas diferenças são devidas à natureza do revestimento, à reação com gases durante o processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido, o

que resulta desta maneira metais aspergidos termicamente que, em geral, são mais duros que os metais que os originaram.

Os revestimentos aspergidos apresentam como principal características uma morfologia lamelar com presença de partículas fundidas ou semifundidas, poros, inclusões que podem alterar as propriedades dos revestimentos (figura 3). Os poros formam-se durante a sobreposição das lamelas, enquanto os óxidos são provenientes da interação química entre as partículas e os gases utilizados na pulverização (Santos, 2008).

Figura 3 – Secção transversal da estrutura de um revestimento por aspersão térmica



Fonte: Krepski (1993).

Alguns dos elementos presentes na estrutura do revestimento (óxidos, inclusões, poros) podem comprometer o desempenho, reduzindo a resistência ao desgaste, resistência à corrosão, aderência, entre outros. As principais características dos revestimentos aspergidos termicamente (Krepski, 1993) são:

- adesividade (baixa/media);
- porosidade (alta/média), em torno de 10 a 20% (No processo HVOF é ≤ 1%);
- adesão interpartícula (baixa/média);
- rugosidade superficial (média/alta);
- porcentagem de óxidos (média/alta).

Nos processos de aspersão térmica as variáveis mais importantes para a obtenção de um revestimento de qualidade e com um maior controle são:

- fonte de calor (combustão ou elétrica);
- material a ser aspergido (morfologia do pó, arame ou vareta);
- o estado da superfície do substrato;
- distância entre a pistola de aspersão e o substrato;
- deslocamento da pistola em relação ao substrato.

A evolução dos processos de aspersão térmica com o desenvolvimento de novos tipos de pistola e controle dos parâmetros de processo faz com que este seja cada vez mais utilizado, apresentando algumas vantagens em relação a outros processos de revestimentos. Em geral as principais vantagens da aspersão térmica segundo Fauchais et al (2011) e ASM (2013), são:

- baixos valores de diluição;
- revestimentos obtidos são homogêneos e densos;
- excelente união metalúrgica com o substrato;
- não produz resíduos sólidos, evitando desta forma a poluição atmosférica bem como a poluição da água;
- grande flexibilidade, devido a utilização de metal de adição em forma de pó, arame ou vareta;
- grande eficiência na utilização do material de adição na forma de pó, arame ou vareta;
- baixa distorção dos componentes revestidos.

3.1.1 Processos de aspersão térmica

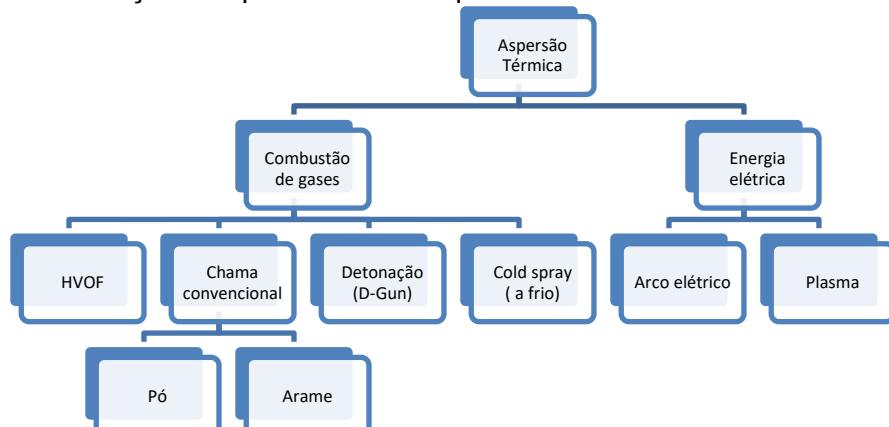
Historicamente os revestimentos metálicos eram utilizados em caráter decorativos, sendo o ouro o principal metal utilizado devido ao seu brilho, cor e resistência mecânica. A primeira aplicação industrial da aspersão térmica foi desenvolvida a partir de um processo de combustão (oxigênio-combustível) por uma equipe de pesquisadores liderados pelo Dr. Max Ulrich Schoop de Zurique na Suíça, baseando-se inicialmente em um processo utilizado na idade média, no qual projetava partículas de metal fundido com jato de vapor ou ar comprimido. O calor gerado por combustão de uma chama a gás (Lima; Trevisan, 2007) foi utilizado para fundir um arame metálico a base de zinco e estanho. Em 1912 veio então a

segunda patente, utilizando a energia elétrica como fonte para produzir calor (Couto, 2006). Esse método foi patenteado pelo próprio Dr. Schoop em março de 1915.

Dados informam que em meados de 1920 a aspersão térmica foi utilizada como proteção contra corrosão, tendo o zinco como metal aspergido. Assim, sucessivamente, ao longo dos anos foram sendo desenvolvidas novas técnicas para aplicação da aspersão térmica. Em 1940, utilizou-se o arco voltaico como gerador de calor por uma pistola. Em 1960 foi desenvolvido um novo processo através do arco plasma e mais tarde a deposição de pó pelo processo de detonação. Já o processo de aspersão térmica à chama utilizando uma pistola hipersônica, foi desenvolvido em 1980, onde foi possível transferir partículas aspergidas com elevada velocidade. Foi a partir da década de 90 que houve uma evolução dos equipamentos e materiais aplicados a aspersão térmica, proporcionando um aumento significativo na velocidade de deposição das partículas, denominado de Aspersão Térmica Oxi-Combustível de Alta Velocidade ou “HVOF”. Com a evolução dos métodos, obteve-se um ganho considerável na redução da contaminação do material aspergido, redução do risco de oxidação e do aparecimento de poros (Lima; Trevisan, 2007).

Os processos de aspersão térmica são classificados em função dos métodos de geração de calor (energia). As fontes mais utilizadas são: energia de combustão de gases e energia elétrica. Esses dois grupos de aspersão térmica estão subdivididos em outros processos como mostra a figura 4:

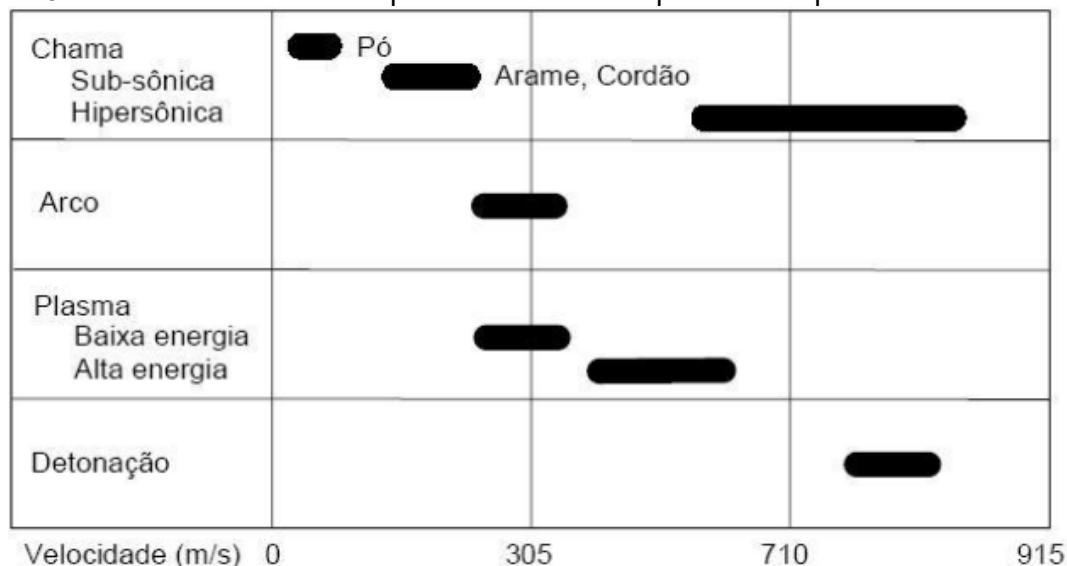
Figura 4 – Classificação dos processos de aspersão térmica



Fonte: Adaptado de Rijeza (2011).

A velocidade com que as partículas fundidas ou semifundidas atingem o substrato é uma das variáveis que influenciará nas propriedades dos revestimentos, tais como a porosidade e a adesividade ao substrato. A figura 5 mostra as velocidades médias com que a partículas atingem o substrato nos diferentes processos de aspersão térmica utilizados. Os processos de chama, subsônica e hipersônica, e os processos por detonação são os que resultam em maior velocidade média, consequentemente maior adesividade dos revestimentos.

Figura 5 – Velocidade média das partículas conforme processo aspersão térmica



Fonte: Marques (2003).

Muitos materiais podem ser utilizados como matéria prima nos diferentes processos de aspersão térmica. A escolha depende da função do componente utilizado como revestimento e do tipo de processo de aplicação do revestimento. A tabela 1 mostra, de forma resumida, uma orientação da aplicação dos processos de aspersão térmica de acordo com a finalidade a qual se busca utilizar os revestimentos. Claro que o desempenho obtido para cada revestimento vai depender de um conjunto de parâmetros de processos e das condições específicas de cada aplicação, assim, são necessários estudos específicos (caracterizações) em cada caso prático.

Tabela 1 – Aplicação da aspersão térmica por tipo de desgaste e material aplicado

Tipo de Desgaste	Material Aplicado	Processo de Aplicação
Adesivo	Bronze-Alumínio	FS;ASP;APS;HVOF
	Babbit	FS;ASP
	Ti	FS;ASP
	Blenda de Mo/Ni-Cr-B-Si	APS
	Molibdênio	FS;ASP;APS
	Aço Alto Carbono	FS;ASP
	Óxidos de Alumínio/Titânio	FS;APS
	Carbeto de Tungstênio	FS;APS;HVOF
	Co-Mo-Cr-Si	APS;HVOF
Abrasivo	Fe-Mo-C	APS
	Oxido de Alumínio	APS
	Oxido de Cromo	APS
	Carbeto de Tungstênio	APS;HVOF
	Carbeto de Cromo	APS;HVOF
	Ni-Cr-B-SiC/WC-(fundido)	FS;HVOF
	Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS;HVOF
	Ni-Cr-B-SiC	HVOF
Fadiga Superficial		
Fretting	Molibdênio	FS;APS
	Blenda de Mo/Ni-Cr-B-Si	APS
	Co-Mo-Cr-Si	APS;HVOF
	Bronze-Alumínio	FS;ASP;APS;HVOF
	Cu-Ni	APS;HVOF
	Co-Cr-Ni-W	APS;HVOF
	Carbeto de Cromo	APS;HVOF
	Carbeto de Cromo	APS;HVOF
	Carbeto de Tungstênio	APS;HVOF
Erosão	WC/Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS;HVOF
	WC/Ni-Cr-B-SiC	FS;HVOF
	Óxido de Cromo	APS
	Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	APS
	Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC	APS
	Aço Austenítico -316	APS
	Ni-Cr-B-SiC-(fundido)	FS;HVOF
	Ni-Cr-B-SiC	HVOF
	Bronze-Alumínio	APS;HVOF
Cavitação	Cu-Ni	APS;HVOF

Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

3.1.2 Aspersão pelo método HVOF

É uma técnica de deposição por pulverização de pós que permite, a um custo razoável, melhorar as características da superfície de um material e prolongar a sua vida, mesmo em ambientes de trabalho particularmente corrosivos, difíceis e perigosos. A pulverização pelo método HVOF é mais simples e rápida em relação a pulverização por Plasma de Arco Transferido – PTA (Kaur, 2012). Geralmente, este resultado do revestimento é obtido sem interferir com as características mecânicas e estruturais do substrato e, assim, sem a necessidade de tratamento adicional, pois não há interação metalúrgica. Pode-se até considerá-lo como um processo de revestimento a frio. O revestimento final é caracterizado principalmente por uma elevada densidade, força de ligação elevada, o que garante um aumento do grau de ancoragem do revestimento, por uma elevada dureza e pouca porosidade (< 1%) baixo nível de rugosidade ($R_a < 2 \mu m$) além de elevada resistência ao desgaste. Estas características variam em função do tipo de material e parâmetros de deposição. A elevada velocidade também permite manter baixas temperaturas de pré-aquecimento do substrato a ser revestido.

O processo faz uso de uma mistura, onde o gás combustível é queimado com o oxigênio a alta pressão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade. Os combustíveis mais utilizados são: acetileno, propano e propileno. Os combustíveis são misturados nas seguintes proporções: oxigênio - acetileno (1, 5: 1 em volume) alcança 3170°C, oxigênio-propileno (4:1 em volume) alcança 2900°C e oxigênio – propano (5:1 em volume) alcança 2700°C.

Os combustíveis são misturados com oxigênio, queimados em uma câmara de bocal, geralmente no sentido axial, e é aquecido e acelerado para fora da mesma. A câmara de combustão e o bocal, devido ao calor gerado, são resfriados a água (Manfrinato, 2010). Na atualidade, pistolas modernas permitem gerar velocidades de gases de transferência de partículas entre 3200 e 5000 m/s.

O pó é geralmente injetado axialmente, porém em algumas pistolas/tochas são injetados radialmente, onde o nitrogênio é utilizado como gás de arraste. A distância de aplicação da aspersão é de 120 a 300 mm. O método HVOF foi desenvolvido como uma alternativa ao método de aspersão por detonação (D-Gun).

O HVOF atualmente também pode ser utilizado como uma opção a aspersão por plasma de arco não transferido-PSP em algumas aplicações (Caravallo; Rossino, 2010). Este processo apresenta bons resultados para revestimentos metal-cerâmicos (Lima; Trevisan, 2007), além da qualidade dos revestimentos e tensões residuais menores (Parker *et al.*, 1991). O pó normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas, podem atingir velocidades de até 1200 m/s (Cortes, 1998), ou seja, três vezes a velocidade do som. O tamanho das partículas do pó utilizado no processo HVOF usualmente é de 5 a 45 µm. A taxa de alimentação de pós pode variar de 20 a 80 g/min. Este método apresenta boa qualidade do revestimento, tensões residuais menores e baixa formação de poros. Um inconveniente desse processo é o nível de ruído, que pode exceder a 140 dB. A figura 6 mostra, de forma esquemática, a aplicação da aspersão por este processo. Já a figura 7 mostra uma pistola bastante utilizada, neste caso do fabricante Sulzer-Metco.

Figura 6 – Esquema de aplicação aspersão térmica pelo processo HVOF



Fonte: Adaptado de Rijeza (2021).

Figura 7 – Pistola/tocha utilizada para aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF



Fonte: O Autor (2025).

Principais características do método HVOF (Pawlowski, 2008):

- velocidade de gás > 2000 m/s;
- alta dureza (1400 HV_{0,3});
- aderência da camada superior a 150 MPa;
- baixa porosidade (< 1 %);
- velocidade dos pós (> 1000 m/s);
- espessura do material depositado de 100 a 300µm;
- superfícies lisas (Ra < 2µm);
- baixa temperatura de pré-aquecimento;

A tabela 2 mostra um resumo das características dos diferentes processos de aspersão térmica.

Tabela 2 – Características entre os processos de aspersão térmica

Processos	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar
Chama (pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O,	30	3	Baixa
Chama (arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média
Arco (arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta
Plasma	4, 2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240	6	Alta
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta
HVOF	28-57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610-1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17-28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240-1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8, 4	8300	Ar e He	240-610	9	Muito Alta

Fonte: Adaptado de Paredes (1998).

A tabela 3 mostra de forma comparativa as propriedades/características dos revestimentos aspergidos termicamente em função dos processos utilizados. A utilização de um determinado processo vai depender além das propriedades mecânicas a serem melhoradas, o tipo de material a ser aspergido, também é uma prerrogativa a ser observada na seleção no processo de aspersão térmica a ser

utilizado, por exemplo: aplicação de carbeto de tungstênio e carbeto de cromo, o processo mais recomendado é o HVOF.

Tabela 3 – Comparação entre os processos de aspersão térmica

continua

Propriedade/ Característica	Tipo de revestimento	Chama de arame	Chama de pó	Arco elétrico	HVOF	Plasma arco não transferi dos	Plasma a vácuo
Resistência adesiva (MPa)	Metais ferrosos	14-26	14-21	24-41	48-62	31-34	100-400
	Metais não ferrosos	7 – 34	7 – 34	14 – 48	48–62	14 – 48	400-750
	Cerâmicas e Carbeto		14– 48		>83	55 – 69	60-100

Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Tabela 3 – Comparação entre os processos de aspersão térmica

conclusão

Propriedade/ Característica	Tipo de revestimento	Chama de arame	Chama de pó	Arco elétrico	HVOF	Plasma arco não transferi dos	Plasma a vácuo
Densidade (% do material bruto equivalente)	Metais ferrosos	85-90	85-90	85-95	85-98	90-95	97-99
	Metais não ferrosos	85-90	85-90	85-95	85-98	90-95	97-99
	Cerâmicas e Carbonetos		90-95		95-98	90-95	95-98
Dureza	Metais ferrosos	84RB- 35RC	80RB- 35RC	85RB- 40RC	90RB- 45RC	80RB- 40RC	30-50 RC
	Metais não ferrosos	40 RC	40-65 RC	35 RC	55RC	45 – 65 RC	50-70 RC
Limitação de espessura do revestimento (mm)	Cerâmicas e Carbonetos		45-55 RC		55-72 RC	50-65 RC	50-70 RC
	Metais ferrosos	0,5 - 2	0,5 - 2	0,5 – 2,5	0,6 - 2,5	0,4 - 2,5	0,05 - 10
	Metais não ferrosos	0,5 - 5	0,5 - 5	0,5 - 5	0,5 – 2,5	0,4 - 5	0,5 - 5

Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA REVESTIMENTOS

Uma das etapas de maior relevância a ser observada quando se define utilizar a aspersão térmica seja como recomposição dimensional ou como revestimento de proteção, é a preparação da superfície. Considerando que o

principal mecanismo de aderência ao substrato é o de ancoramento mecânico, a superfície tem de ser preparada adequadamente antes de receber o revestimento.

Preparar a superfície significa executar operações que permitam obter limpeza e rugosidade. A limpeza elimina os contaminantes, oxidação e tintas maladeridas, que poderiam prejudicar a aderência do revestimento. A rugosidade aumenta a superfície de contato, o ancoramento mecânico e ajuda a melhorar a aderência (Gnecco, 2003). Palová *et al.* (2023) realizaram estudos sobre a incerteza nas medições de rugosidade de superfícies usinadas, a fim de obter uma metodologia para minimizá-las.

Os principais fatores que influenciam a preparação e consequentemente, na adesão do revestimento são: limpeza, texturização, camada de ligação e preaquecimento. A seguir será abordado cada um destes itens de forma resumida.

3.2.1 Limpeza

Os processos utilizados para a limpeza são divididos em duas categorias, a limpeza química e a limpeza mecânica, podendo ser empregadas em conjunto ou isoladamente. Por limpeza química pode-se citar a detergência, o desengraxamento e a decapagem ácida. O processo de limpeza mecânica é o mais utilizado na aspersão térmica, que consiste na ação mecânica de materiais abrasivos a fim de remover óxidos ou sujidades (óleos e graxas, em geral) da superfície metálica, dando como resultado uma superfície limpa. A limpeza mecânica pode ser realizada por processos manuais ou mecanizadas (Gentil; Carvalho, 2022).

A norma ISO 8501 (2007) estabelece e recomenda diversos graus de limpeza para preparação da superfície metálica que passará pelo processo de aspersão térmica, sendo eles identificados pelas seguintes especificações:

O termo “SA” indica preparação de superfície realizada por jateamento abrasivo, o termo “ST” Indica preparação de superfície cuja limpeza é realizada com ferramentas manuais e/ou mecânicas, O termo “FI” indica limpeza de superfície com chama.

Como os contaminantes estão presentes nos materiais oriundos dos processos de fabricação, por exemplo, na laminação a quente, onde as normas SIS 05 5900 e ISO 8501 estabelecem quatro graus de oxidação que uma chapa

laminada a quente pode chegar, durante a eliminação da carepa de laminação, por exposição ao ambiente, isto é, intemperismo (Gentil, 2016). A tabela 4 mostra o grau de corrosão em que as superfícies metálicas podem estar expostas.

Tabela 4 – Diferentes graus de corrosão

Grau de Corrosão	
Grau A	Superfície de aço com a carepa de laminação intacta e praticamente sem corrosão
Grau B	Superfície de aço com princípio de corrosão, onde a carepa de laminação começa a desagregar.
Grau C	Superfície de aço onde, a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão ou que possa ser removida por meio de raspagem, podendo apresentar formação leve de alvéolos;
Grau D	Superfície de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão com formação severa de corrosão alveolar.

Fonte: Gentil (2016).

Há normas que padronizam determinados processos para o preparo de superfícies metálicas destinadas à aspersão térmica. Entre elas, destacam-se a norma americana SSPC (“Steel Structure Paint Council”), a norma sueca SIS 05 5900-67 (“Pictorial Surface Preparation”) e as normas ISO 8501 (“Blast Cleaning & Power Tool Cleaning”) e ISO 8502-3 (2017), ISO 8503 e ISO 8504, que são mais recentes. Além disso, outras normas, como as da Petrobras N-2846, a NACE (“National Association of Corrosion Engineers”) e a BS-4232-67 (“British Standard”), possuem correspondência com a SSPC, conforme ilustrado na Tabela 5.

As quatro séries de Normas Internacionais (ISO) mencionadas tratam dos aspectos da preparação de substratos de aço, antes da aplicação de tintas e produtos relacionados, onde cada uma delas tratam de realizações específicas, como:

- A ISO 8501 trata sobre avaliação visual da limpeza da superfície;
- A ISO 8502 diz respeito sobre testes para avaliação da limpeza da superfície;
- A ISO 8503 especifica sobre as características de rugosidade da superfície de substratos de aço limpos por jateamento;
- A ISO 8504 menciona os métodos de preparação de superfície.

Tabela 5 – Grau de limpeza de superfícies metálicas

Tipo de Limpeza	SSPC	SIS	Petrobras	NACE	BS	ISO 8501
Limpeza com solvente	SP-1		N-5			
Tratamento mecânico	SP-2	St 2	St 2			St 2
Tratamento mecânico	SP-3	St 3	St 3			St 3
Jateamento ligeiro	SP-7	Sa 1	Sa 1	NACE-4		Sa 1
Jateamento comercial	SP-6	Sa 2	Sa 2	NACE-3	3rd Quality	Sa 2
Jateamento ao metal quase branco	SP-10	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	NACE-2	2nd Quality	Sa 2 1/2
Jateamento ao metal branco	SP-5	Sa 3	Sa 3	NACE-1	1st Quality	Sa 3
Limpeza a fogo	SP-4					
Decapagem química	SP-8					

Fonte: Adaptado de Lima e Trevizan (2007).

Os processos de limpeza química são classificados em três categorias: detergência, desengraxamento e decapagem ácida.

A limpeza por detergência, também chamada de limpeza alcalina, varia conforme o tipo de aplicação. Os chamados alcalinos pesados, como os à base de carbonatos de sódio, são indicados para a limpeza de aço quando há sujeira intensa e de natureza severa (Gentil, 2016).

O desengraxamento pode ser realizado por diferentes métodos, incluindo vapor, jato de solvente em câmara de vapor e imersão em solvente a quente e vapor.

Por fim, destaca-se a decapagem ácida, um processo altamente eficiente para remover impurezas, como óxidos, hidróxidos e sulfetos, além de controlar a espessura dessas camadas. O reagente químico ideal deve eliminar a camada de óxido sem comprometer a superfície do substrato que será aspergido. Recomenda-se que a decapagem seja realizada logo após o desengraxe para melhores resultados.

Além da limpeza química, a limpeza mecânica pode ser executada por meio de ferramentas manuais ou mecânicas, bem como pelo processo de jateamento abrasivo.

As ferramentas manuais ou mecânicas são recomendadas em situações onde o jateamento abrasivo não é viável, como na proximidade de motores elétricos, painéis elétricos ou outros equipamentos sensíveis à poeira abrasiva e sua deposição durante a limpeza.

Entre as principais ferramentas manuais utilizadas, destacam-se: lixas, escovas de aço, raspadeiras e martelos de impacto. Já no caso das ferramentas mecânicas, as pistolas de agulhas, escovas de aço e lixadeiras rotativas são amplamente empregadas no tratamento de superfícies de aço.

Para a preparação de superfícies destinadas à aspersão térmica, a limpeza por jateamento abrasivo é a mais recomendada. Esse processo utiliza o princípio da abrasão, no qual partículas de materiais duros, como limalhas ou granalhas de ferro e aço, óxidos de alumínio e carbonetos de silício, colidem em alta velocidade com a superfície a ser limpa. A escolha do abrasivo deve considerar sua forma, densidade e granulometria (AWS, 1985).

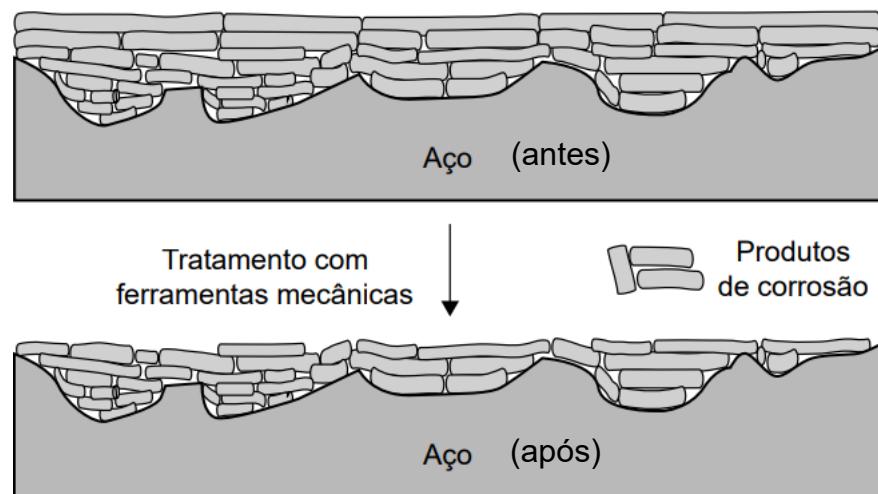
Abrasivos de formato angular são os mais indicados devido ao seu alto poder de limpeza e asperização, embora possam aderir a substratos mais macios, como o alumínio (Maranho, 1996). Já abrasivos esféricos não são recomendados para obtenção de rugosidade, pois resultam em uma superfície aplinada, típica do tratamento por *shot peening*³, o que pode comprometer a aderência do revestimento (Howes, 1994).

Velasco *et al.* (2022) mostraram as principais características dos jateamentos abrasivos conforme a norma ISO 8501. Os padrões visuais de preparação de superfícies podem ser vistos nos trabalhos publicados por GNECCO, Matsumoto (2017). Independentemente do método empregado, é recomendável que, após a limpeza mecânica, a superfície seja submetida a uma etapa final de remoção de resíduos por meio de aspirador, ar comprimido ou escova (AWS, 1985).

As figuras 8 e 9 mostram de forma esquemática os resultados obtidos das limpezas das superfícies por meio de ferramentas mecânicas e jateamento abrasivo, sendo esse mais eficiente, pois remove todos os produtos da corrosão.

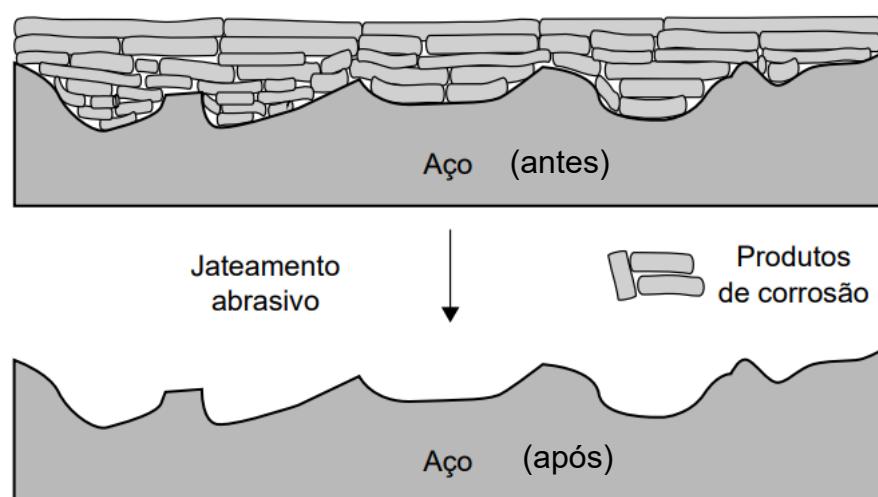
³ Shot Peening – Tratamento superficial para aumentar resistência fadiga de materiais metálicos

Figura 8 – Representação esquemática, antes e após a preparação da superfície por meio de ferramentas mecânicas



Fonte: Gentil e Carvalho (2022).

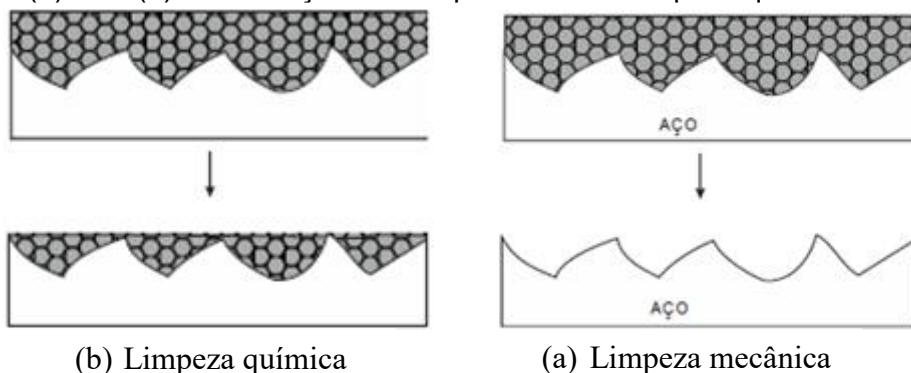
Figura 9 – Representação esquemática da eficiência do jateamento abrasivo



Fonte: Gentil e Carvalho (2022).

As figuras 10(a) e 10(b) mostram de forma clara a vantagem que o processo de limpeza mecânica tem em relação à limpeza química, pois praticamente remove todos os resíduos que porventura ficariam depositados nas protuberâncias do material.

Figuras 10 (a) e 10 (b) – Diferença entre os processos de limpeza química e mecânica



Fonte: Gentil (2016).

A ligação entre o revestimento e o substrato é mecânica, mas alguns metais e compostos formam ligações metalúrgicas e químicas com o substrato. Uma camada de ligação é utilizada quando a camada aspergida é muito fina, dura ou onde a preparação por jateamento abrasivo é impraticável. As ligas mais comuns utilizadas como camada de ligação são as ligas de Ni-Al, Ni-Cr-Al e certos compostos de níquel, por terem uma boa aderência ao substrato sob qualquer condição, onde uma fina camada serve como âncora para a primeira de revestimento. Todavia, a oxidação deve ser evitada (Howes, 1994).

3.2.2 Texturização de superfícies

A texturização é a modificação do aspecto morfológico de uma superfície, podendo ser utilizada em escala macro ou micrométrica, dependendo das finalidades.

A texturização superficial também pode ser utilizada como melhoria do desempenho tribológicos de contatos de componentes mecânicos, em particular, em regimes lubrificados.

Parreira (2011), em seus experimentos através da técnica de dissolução eletroquímica, conhecida como texturização eletroquímica, obteve bons resultados, mostrando em testes tribológicos uma redução significativa do atrito e diminuição do desgaste de superfícies texturizadas lubrificadas com bissulfeto de molibdênio MoS₂ quando comparado com uma superfície lisa.

Nesta pesquisa, utilizaremos a microtexturização como método de modificação da topografia das superfícies criando padrões de microcavidades regularmente espaçadas através do jateamento.

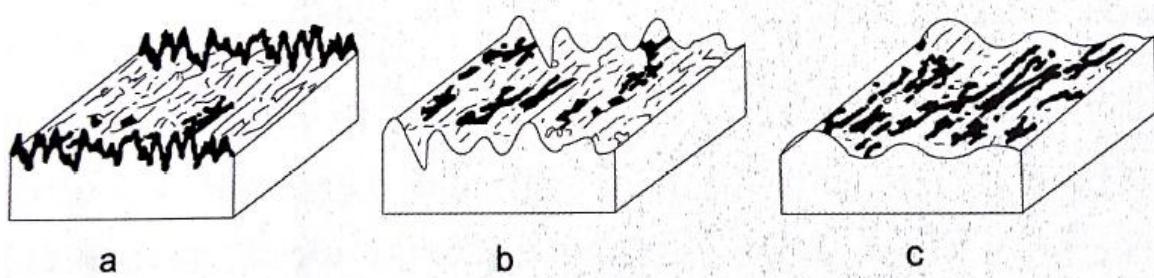
Após a limpeza, a superfície deverá apresentar uma rugosidade para que ocorra a adesão satisfatória do material aspergido ao substrato, o que se torna ainda mais importante quando se trabalha com o substrato na temperatura ambiente. Essa preparação pode ser a última etapa antes da aplicação do revestimento. Deve-se ressaltar que a texturização é de extrema importância, sendo um dos principais requisitos para uma boa aderência mecânica.

Várias técnicas já estão disponíveis para criar texturas em uma superfície, criando padrões de micrométricos e eventualmente nanométricos (Michel *et al.*, 2001).

Considerando-se o valor da rugosidade do substrato nas propriedades finais do revestimento, achou-se por bem definir as características microgeométricas que influenciam na adesão (Lima; Trevisan, 2007) e ISO 4287. Desta forma, as características que interferem na força de adesão entre o revestimento e o substrato são basicamente:

- números de picos e vales (figura 11) dentro de um determinado comprimento de perfil de rugosidade, onde quanto mais alto o número de picos dentro de um mesmo comprimento, maior será o efeito de ancoragem, consequentemente, melhor será a adesão;
- área da superfície verdadeira: Quanto maior a área real da superfície, melhor é a adesão do revestimento, pois terá uma área de ancoragem superior.

Figura 11 – Picos e vales de três superfícies diferentes



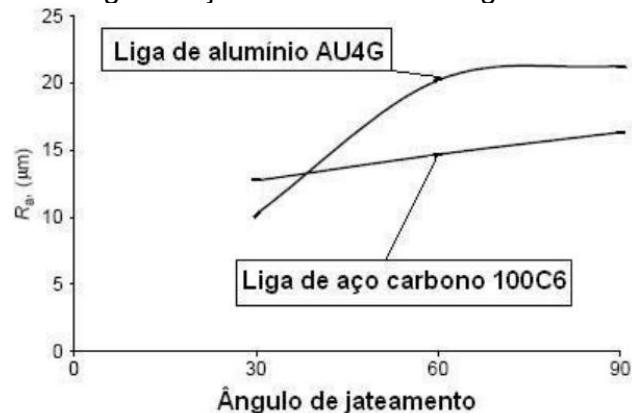
Fonte: Lima e Trevisan (2007).

De acordo com a figura 11, a superfície (a) proporciona melhor efeito de ancoragem em relação à (b) e (c), pois apresentam maior número de picos e vales.

Na prática como na literatura especializada, os parâmetros, rugosidade média R_a e a profundidade de rugosidade R_y , são os mais usados para avaliar a rugosidade superficial do substrato. De um modo geral, a rugosidade mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta R_a entre 2,5 e 13 μm . A norma Petrobras (N-2568 de 2011), para revestimentos metálicos por aspersão térmica, estabelece para valores de rugosidade R_y variando de 75 a 120 μm .

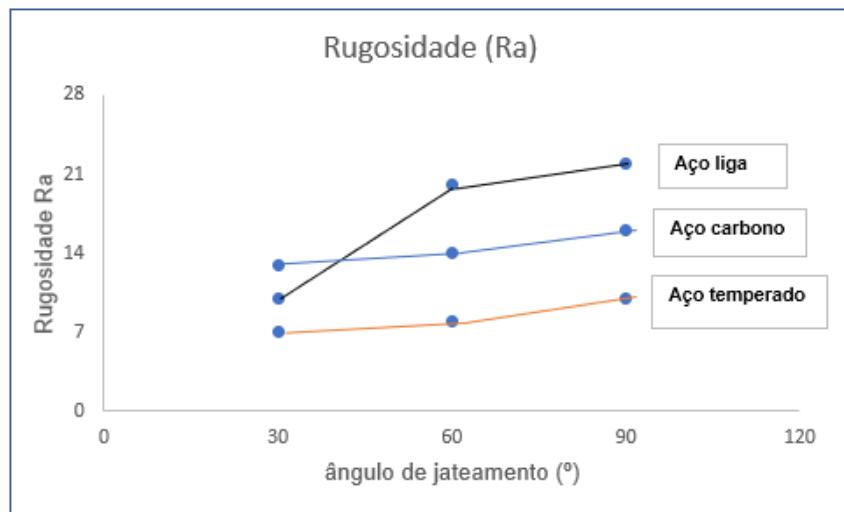
Os principais parâmetros que influenciam a texturização de um substrato são: o modelo do equipamento, o tipo e as condições do abrasivo, ângulo, distância pressão e tempo de jateamento (Mellali, 1997). As figuras 12 e 13 mostram essas influências conforme (Pawlowski, 2014), (Wigren, 1998) citado por (Lima; Trevisan, 2007).

Figura 12 – Influência do ângulo de jateamento de uma liga de alumínio e aço carbono



Fonte: Pawlowski (2014).

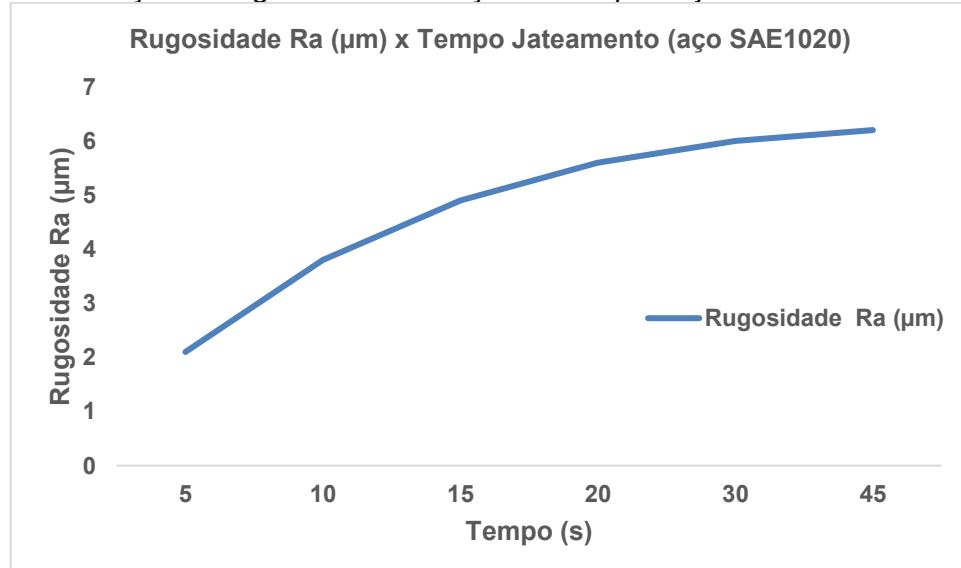
Figura 13 – Influência do ângulo de jateamento na obtenção da rugosidade de aços com diferentes durezas



Fonte: Adaptado de Mellali (1997).

A figura 14 mostra a variação da rugosidade com o tempo de jateamento (Wigren, 1998).

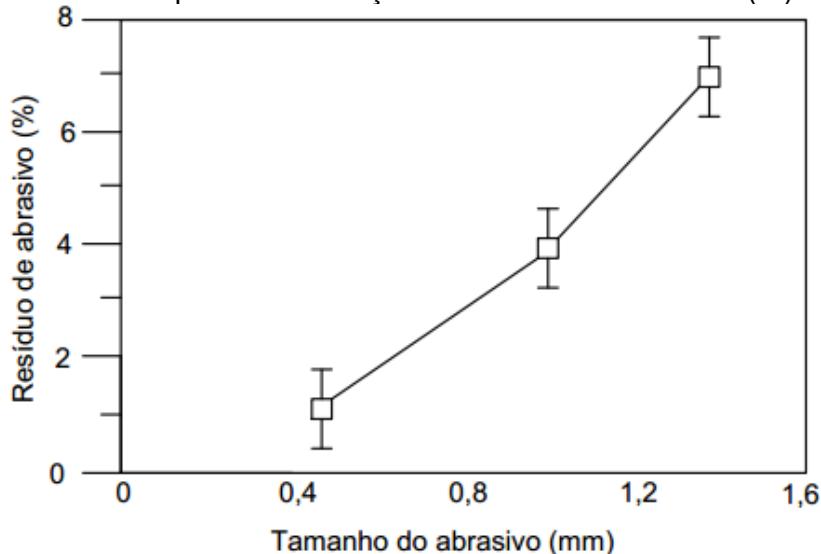
Figura 14 – Variação da rugosidade em função do tempo de jateamento



Fonte: Adaptado de Wigren (1998).

A figura 15 mostra uma correlação entre a rugosidade e o resíduo de abrasivo, que é influenciada pelo tamanho de grão do abrasivo (Mellali, 1997).

Figura 15 – Resíduo na superfície em função do tamanho do abrasivo (%)



Fonte: Mellali (1997).

O aumento de resíduos é quase linear com os tamanhos dos grãos do abrasivo (Mellali, 1997). Dessa forma conclui-se que, utilizando o jateamento abrasivo convencional para produzir a texturização na superfície do substrato, o mesmo produz uma certa incrustação de pequenas partículas de abrasivo no substrato, como consequência do impacto e fratura do abrasivo, que são conhecidas como resíduos e que podem interferir, de maneira indesejável, na aderência do revestimento aplicado. Uma alternativa que eliminaria esse inconveniente de formação de resíduos, é a texturização da superfície utilizando jato de água com alta pressão. Para tanto, pressões de 350 MPa devem ser usadas para obter resultados significativos (Knapp, 1996).

No processo de preparação de peças que serão recuperadas as condições originais de projeto, há a necessidade de após a limpeza química e o jateamento abrasivo, a mesma deve ser submetida a um processo de formação de ranhuras, cujas dimensões vão depender da espessura da camada de material a ser aspergido, que são dimensionadas proporcionalmente, ou seja, quanto maior for a camada a ser aspergida, maior será a profundidade das ranhuras, isto ocorre para haver uma maior ancoragem do material aspergido ao substrato, garantindo dessa forma, maior aderência do revestimento.

3.2.3 Camada de ligação

Materiais de dureza elevada ou relativamente moles necessitam de uma camada de ligação para formar uma forte ligação Interatômica (física ou difusional) com o substrato. Essas camadas de ligação são normalmente finas e produzem uma superfície rugosa para facilitar a aderência do revestimento. São aplicadas onde a usinagem e o jateamento não podem ser utilizados, devido a dificuldades de acesso ou onde podem ocorrer distorções excessivas, devido à dureza do substrato.

Camadas de ligação são recomendadas quando os substratos forem de aços temperados, superligas e ou ligas de alta dureza. Ocasionalmente são utilizados em materiais cerâmicos (Mellali, 1997).

3.2.4 Preaquecimento do substrato

Experimentos mostraram que a prática de pré-aquecer o substrato, melhora a adesão do revestimento (Mellali, 1997), pois retardam o resfriamento das partículas para melhorar o contato substrato/partículas e promover a ligação térmica. Cuidados devem ser tomados para não favorecer o aparecimento de camadas espessas de óxidos. Na prática, sugere-se que as superfícies sejam aquecidas a temperaturas entre 80 e 140°C. (Camargo, 1999).

3.3 ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL

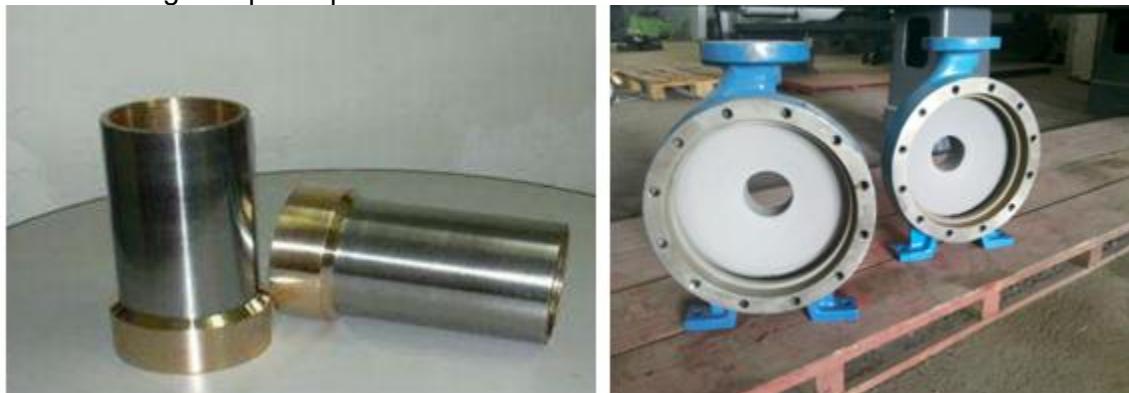
Quando comparada a outros processos de recomposição dimensional, assim como o da soldagem, a aspersão térmica oferece diversas vantagens. Entre elas, destacam-se a ausência de distorção e de zonas termicamente afetadas, além de menores níveis de oxidação e tensões residuais. Isso ocorre porque a aspersão térmica é essencialmente um processo de revestimento a frio. Além disso, na maioria dos processos utilizados, não há interação metalúrgica entre o material aspergido (revestimento) e o substrato (material que recebe o revestimento).

Atualmente, a aspersão térmica tem sido amplamente utilizada pela indústria na recuperação de componentes desgastados, considerando que a substituição por novas peças pode representar um custo elevado. É fundamental, no entanto, que

os materiais aplicados atendam ou superem os requisitos do projeto original do componente.

A Figura 16 ilustra um exemplo da aplicação desse processo, apresentando luvas e volutas de bombas centrífugas que, ao invés de serem descartadas, foram recuperadas para suas condições originais por aspersão térmica. Nesse caso, a recomposição dimensional foi realizada com um revestimento de liga de aço inoxidável AISI 420, conferindo maior resistência ao desgaste adesivo e abrasivo (TST, 2024).

Figura 16 – Componentes de bombas (luvas e corpo espiral) que foram recuperadas suas dimensões originais por aspersão térmica



Fonte: O Autor (2025).

Castro *et al.* (2014) realizaram um estudo substituindo a recomposição dimensional de haste de cilindros hidráulicos, tradicionalmente recuperadas por eletrodeposição com cromo duro, por um revestimento de metal duro (WC-Co) aplicado por aspersão térmica pelo processo HVOF. Os resultados obtidos superaram aos do cromo duro, quando analisadas a resistência ao desgaste, porosidade, dureza e coeficiente de atrito. Também enfatizou que a aspersão térmica é um processo limpo, que praticamente não deixa resíduos, o que não ocorre no processo de eletrodeposição do cromo duro.

Comeli (2006) também utilizou a aspersão térmica para revestir uma haste válvula parcializadora de uma turbina termoelétrica. O revestimento foi de carboneto de cromo (Cr_3C_2) numa matriz de níquel-cromo (NiCr) aplicado pelo processo HVOF, em substituição do tratamento termoquímico de nitretação. Obteve resultados considerados bons, tais como: porosidade menor que 3%, rugosidade entre 2,0 e 4,7 μm e microdureza Vickers $950\text{HV}_{0,5}$.

Freire (2002) avaliou diferentes revestimentos aplicados HVOF para aplicação em ponteiras de raisers⁴ que são fabricadas em aço AISI 4130 e revestidas originalmente com níquel, sujeitas a corrosão marinha. Inicialmente tentou-se revestimento de níquel aplicado por chama a pó, porém não obteve sucesso devido à baixa aderência e porosidade, provocando desplacamento do revestimento. Ele verificou a influência das variáveis de aspersão na dureza, microestrutura, desgaste abrasivo e riscamento dos revestimentos e optou por um revestimento duro, alta aderência e baixa porosidade. Seus resultados mostraram que os revestimentos cermets⁵ WC-17Co e WC-10Co-4Cr apresentaram melhor desempenho, permitindo camadas de qualidade com baixa porosidade e boas características mecânicas (dureza e resistência ao desgaste).

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS.

A obtenção de revestimentos de qualidade e que possam desenvolver um desempenho desejado, resistência ao desgaste, por exemplo, é necessário realizar um controle rigoroso em todas as etapas do processo.

Uma deficiência que podemos destacar no emprego da aspersão térmica, é que as avaliações das propriedades dos revestimentos ainda não são padronizadas na sua totalidade, pois no interior de um mesmo revestimento as propriedades podem ser diferentes, pois eles possuem características anisotrópicas, isso se deve ao fato da microestrutura ser lamelar e alinhada com o plano do substrato.

Vale destacar que as propriedades de um revestimento realizado por aspersão térmica têm como principal característica a adesão entre a camada aspergida e o substrato, bem como a coesão entre as partículas depositadas.

Os principais defeitos que podemos encontrar num revestimento são: poros, trincas, presença de óxidos, pois tudo isso fazem parte de todo revestimentos.

As principais propriedades avaliadas na caracterização dos revestimentos aspergidos são: adesividade (adesão), porosidade, dureza e resistência ao desgaste abrasivo. A seguir nos itens de 3.4.1 a 3.4.4 serão abordadas cada uma destas técnicas de caracterização.

⁴ Raisers - Tubos que ligam uma estrutura de produção offshore flutuante, ou plataforma de perfuração a um sistema submarino.

⁵ Cermet – Material compósito obtidos pela composição de materiais cerâmicos e metálicos

3.4.1 Avaliação da adesividade dos revestimentos

Um dos maiores questionamentos em revestimentos é quanto a sua aderência ao substrato. As resistências adesivas (adesão) e coesiva (coesão) podem ser consideradas as mais importantes propriedades que um revestimento deve apresentar, sendo esses os requisitos primordiais para um bom desempenho. A aderência é um requisito fundamental que se sobrepõe a outras propriedades do revestimento. Uma camada, ainda que microestruturalmente ideal, é inútil sem a adesão adequada ao substrato para desempenhar sua função. Portanto, pode-se dizer que medir a adesão é extremamente importante por diversas razões, onde podemos citar (Berndt, 1994):

- a) a avaliação da influência das variáveis do processo e da preparação do substrato, permite otimizar as condições para se obter a resistência de adesão requerida;
- b) identificar no revestimento partes que tenham uma menor resistência e avaliar se podem ser aceitáveis.

Atualmente os ensaios para análise da aderência dos revestimentos são destrutivos e apresenta deficiências que, de certa forma, interferem nos resultados obtidos.

O método mais utilizado é o de tração (*Tensile Adhesion Test – TAT*) (Berndt, 1994). Trata-se de um teste de tração relativamente simples e tem sua aplicabilidade tanto industrial quanto laboratorial. Deve-se atentar que diversos fatores podem interferir nos resultados, portanto é necessário conhecer as deficiências, tanto na preparação dos corpos de prova quanto na execução do ensaio.

Os ensaios de tração podem ser considerados como métodos diretos de medição, os quais se baseiam no tracionamento vertical do revestimento. Podemos dizer que esse método é um dos melhores, pois apresenta uma maior padronização e é normatizado por quatro organismos internacionais, sendo eles: ASTM C633- (EUA), AFNOR-NF A91-202-79 (França), DIN-50-160-A-81(Alemanha) e JIS-H8666-80 (Japão) (Berndt, 1994).

A tensão de resistência de adesão a tração é calculada pela equação 1:

$$\sigma_{\max} = F/A \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Onde:

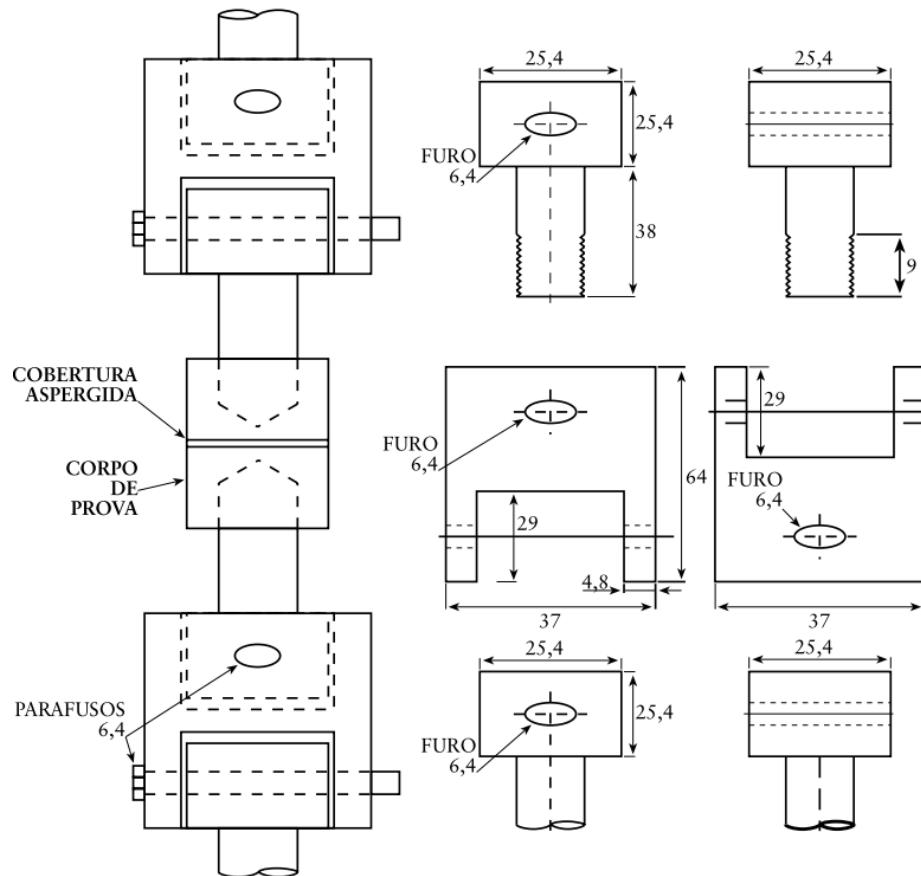
- F é a carga máxima antes da ruptura;
- A é a área da secção transversal da amostra, neste caso, a área do círculo.

Embora as normas orientem as dimensões dos corpos de prova, a comparação direta dos resultados de adesão é dificultada por dois fatores principais: a variação na espessura dos revestimentos e a diferença no diâmetro dos substratos (que pode variar de 25, 4 a 40 mm). Essa variabilidade nas condições de ensaio pode levar a resultados de adesão distintos para um mesmo tipo de revestimento, dificultando a correlação com dados de outros estudos.

Um dos testes de resistência adesiva mais utilizado é o ASTM C633-79, com revisão em 2001 (ASTM, 2001) "Método de Teste Padrão para Adesão ou Resistência Coesiva de Revestimentos Pulverizados por Chama", é amplamente utilizado na indústria e na pesquisa para avaliar as resistências de união de revestimentos por aspersão térmica. Trata-se de um teste de baixo custo e praticidade, justificando sua grande aplicação e aceitação.

Esta norma orienta que os corpos de prova utilizados como substrato devem ser cilíndricos com 25,4 mm de diâmetro e um comprimento de 25,4 mm. Este ensaio prevê a junção dos corpos de prova revestidos com uma contraparte de mesma dimensão, em aço baixo carbono SAE 1020. O dispositivo de fixação para esse ensaio é padronizado como mostra a figura 17:

Figura 17 – Dispositivo de compensação recomendado para realização do ensaio de adesividade segundo a norma ASTM C633-R21



Fonte: O Autor, adaptado de ASTM C633 (2021).

Através do ensaio de tração é possível uma avaliação da resistência adesivo-coesiva dos revestimentos. Nesse ensaio com uso de adesivo podem ocorrer três tipos de fraturas em função do local onde ocorreu a mesma:

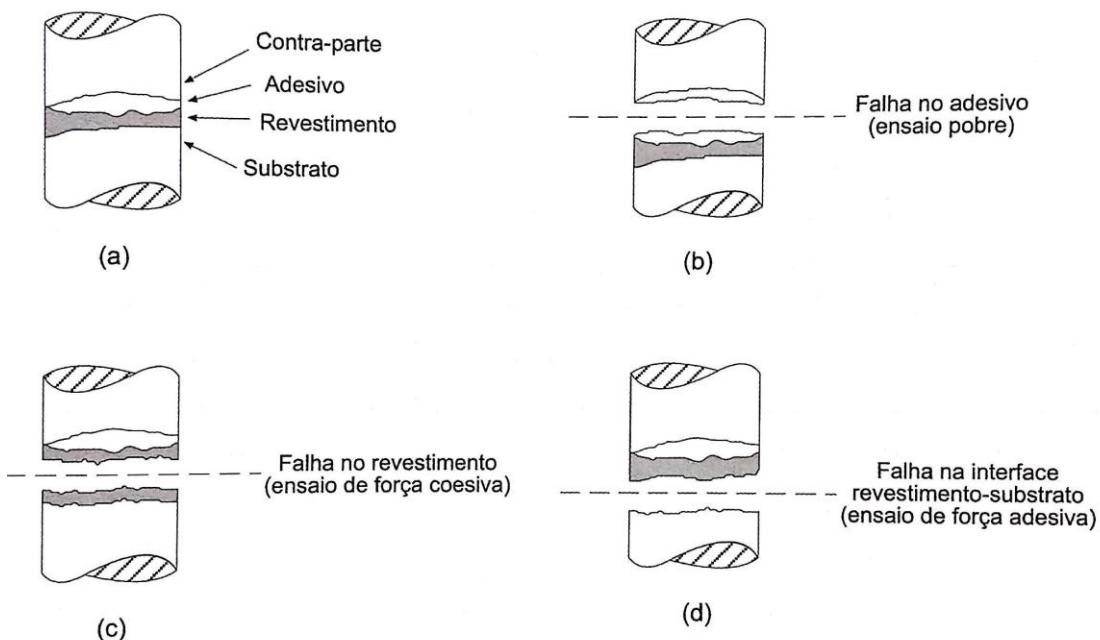
- a) fratura adesiva, se a fratura ocorre na interface revestimento/substrato;
- b) fratura coesiva no interior do revestimento;
- c) e no adesivo, qualquer posição no interior do adesivo ou nas suas interfaces.

Para junção, utiliza-se um adesivo à base de epóxi onde, após a cura do adesivo, o conjunto é montado e tracionado com um controle da velocidade, que varia de 0,013 a 0,021 mm/s. A espessura mínima da camada a ser ensaiada é de 380 µm.

O alinhamento preciso entre a amostra e seu contracorpo é um fator crítico na realização do ensaio, pois qualquer desvio pode comprometer a validade dos resultados (TSS, adaptado da ASTM C633-R21).

A figura 18 mostra os tipos de fraturas oriunda do ensaio de tração para determinação da resistência adesiva.

Figura 18 – Tipos de fraturas resultantes do teste de adesividade



Fonte: ASTM C633 (2001).

Há também um teste denominado por arrancamento por fita, “Tape Test”, utilizado para avaliar a aderência de revestimentos de baixa e média aderência. Pode ser considerado como um teste não destrutivo, pois a superfície testada pode ser reparada. Ele é padronizado pela norma ASTM-D3359-95. É designado para revestimentos com uma faixa de adesão até 6 MPa. Sendo mais apropriado para avaliar adesão de tintas, vernizes e plásticos aplicados em metais.

Para a validação do teste de adesividade, a ASTM C633-R21 comenta que a falha no agente de ligação pode ser um resultado satisfatório para uma garantia do teste de controle de qualidade ou para um teste de qualificação, se a força do agente de ligação for maior que a adesão mínima necessária ou força de coesão do revestimento. Já Steffens *et al.* (1991) dizem que adesão básica deve ser avaliada considerando-se o grau de cobertura de partículas após o ensaio de adesão. Greving *et al.* (1994), empregando o ensaio C-633-R21 como referência, fizeram uma alteração no comprimento do corpo de prova, que passou de 25,4 mm para 38,1 mm, com o objetivo de facilitar a utilização dos conceitos de mecânica de fratura na análise e na avaliação da adesão de revestimentos de níquel-alumínio. Leigh *et al.* (1994) executaram o teste da norma C633-R21 com modificações

(denominado Single Bar- SB), o qual permitiu acomodar amostras largas e achatadas de até 152 x 152 x 152 mm, fixadas por adesivo somente na parte inferior, ficando posicionadas entre duas juntas universais, auto alinhadas. Uma deficiência desse sistema proposto pode estar na falta de simetria do sistema montado, levando a variações entre as tensões reais sobre o revestimento e as tensões determinadas no tracionamento.

Metterns-Lecomte *et al.* (1994) e Dallaire *et al.* (1992) utilizaram o ensaio da norma ASTM-C633-13, para caracterizar satisfatoriamente distintos revestimentos de barreira térmica aplicados por aspersão.

Avaliando a influência da rugosidade sobre a aderência de revestimentos cerâmicos aplicados por plasma sobre substratos cerâmicos, Bergmann (1994) utilizou o teste de flexão em três pontos e conceitos da mecânica de fratura para determinação da adesão. Weiss (1995) discute em seu trabalho que os testes normalizados para os ensaios de adesão, como no caso aqui estudado, ficam limitados pela resistência adesiva do ligante (adesivo), enquanto o teste de cisalhamento (*shear test*) não apresenta essa limitação.

A norma N 2568-19 da Petrobrás estabelece os seguintes requisitos mínimos de resistência para revestimentos:

- **Alumínio e 85Zn15Al:** resistência individual mínima de 10,3 MPa e média de 13,8 MPa.
- **Zinco:** resistência individual mínima de 5,52 MPa e média de 6,90 MPa.

Após a fratura, os corpos de prova devem ser examinados para se identificar a natureza da falha.

3.4.2 Avaliação da porosidade nos revestimentos

Os revestimentos obtidos por aspersão térmica são formados por superposição de partículas achatadas, por isso apresentam muita porosidade. McPherson (1981) em seus estudos mostrou que os poros possuem tamanhos de 10 a 100 µm. A porosidade é inerente a todos os processos de aspersão térmica. As principais fontes responsáveis pelo surgimento de poros são (Vreijling, 1998):

- a) ângulo de aspersão;
- b) partículas sólidas não fundidas.

Mesmo não tendo um consenso sobre os mecanismos de formação de poros, há uma unanimidade de que a porosidade deva ser controlada.

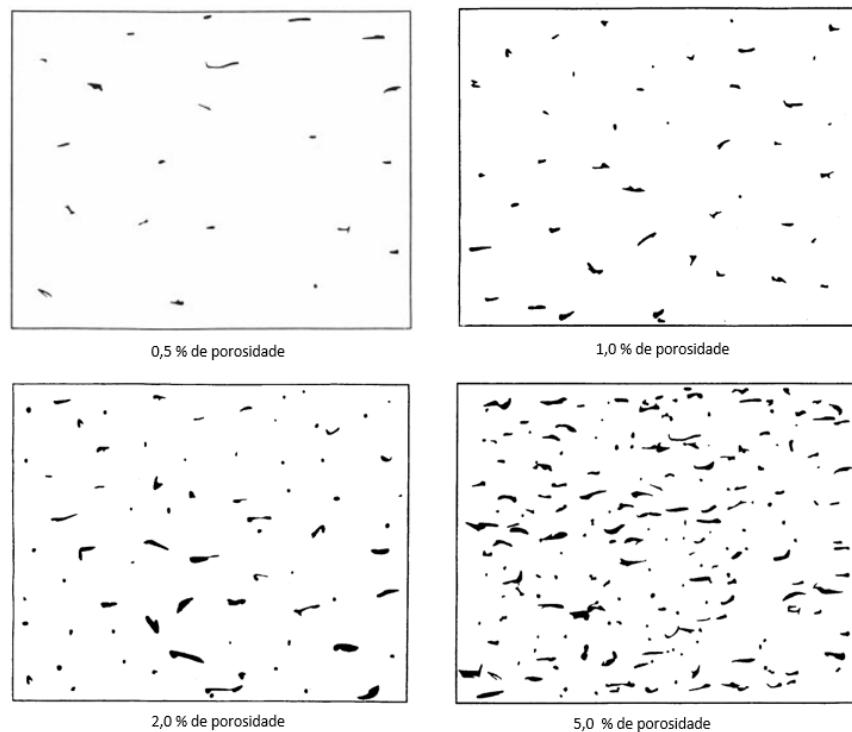
É comum nos revestimentos aplicados pelo processo de aspersão térmica, a presença de poros ficar na faixa de 10 a 20 %, porém no caso dos revestimentos pelo processo HVOF, o qual foi realizado nossos revestimentos, pode-se obter valores menores ou igual a 1%. A porosidade ocorre devido à concentração entre as partículas que se achatam e aderem às protuberâncias (irregularidades) da superfície. Ela tem uma forte correlação com o processo utilizado e com a velocidade em que as partículas são depositadas no substrato, causando uma influência sobre os materiais aspergidos e degradando assim as suas propriedades mecânicas (Lima; Trevisan, 2007). Um método eficaz para minimizar essa inconveniência é a aplicação de selantes, que tem como objetivo bloquear os poros e impedir a penetração do eletrólito até o substrato, evitando assim a falha prematura do componente ou peça. Já no processo HVOF não se faz necessário essa aplicação de selantes devido à baixa porosidade resultante desse processo. Vreijling (1998) em seus estudos analisou os mecanismos de formação e os classificou em sete tipos distintos, as figuras 19 e 20, mostram as imagens que serviram de referência por comparação, para quantificar o percentual de poros conforme orienta a norma ASTM E-2109-21.

A American Society for Testing and Materials propõe um método de ensaio padrão para avaliar a porcentagem de porosidade em revestimentos aplicados por aspersão térmica. O procedimento consiste em analisar, por meio de contraste de cor ou diferença de fase, a proporção de área ocupada pelos poros na região avaliada. Esse método de ensaio trata apenas de métodos de medição recomendados e nada nele deve ser interpretado para definir ou estabelecer limites de aceitabilidade para qualquer valor medido de porosidade. A norma não aborda preocupações de segurança associadas ao seu uso. Ela diz que é de responsabilidade do usuário da norma estabelecer práticas de segurança, saúde e determinar a aplicabilidade e limitações regulatórias antes do seu uso.

Os métodos que compõem essa norma cobrem os procedimentos para realizar o ensaio da porosidade de amostras que foram revestidas por aspersão térmica (TSCs – *Thermal Sprayed Coatings*). Esta norma é composta por dois métodos: O método A, é manual e direto, onde se compara com imagens de sete

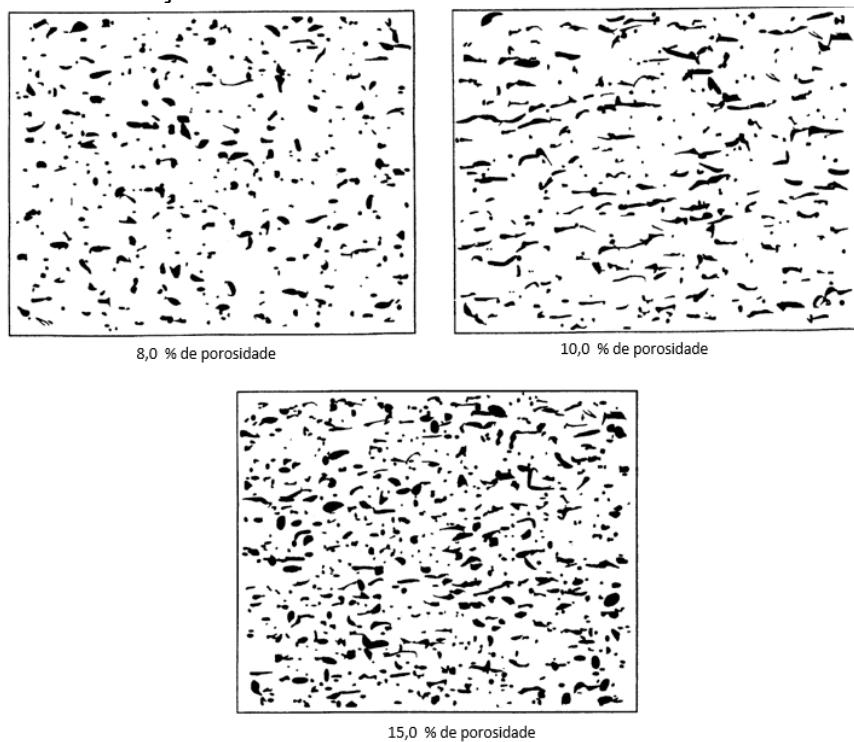
figuras padrão existente na norma. Um exemplo é o que podemos ver nas figuras 19 e 20.

Figura 19 – Imagens padrão método A de comparação direta da porosidade em revestimentos



Fonte: ASTM E-2109 (2021).

Figura 20 – Imagens padrão método A de comparação direta da porosidade em revestimentos -continuação



Fonte: ASTM E- 2109 (2021).

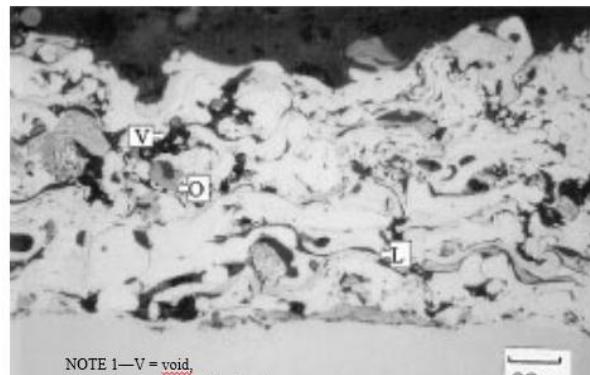
Já o método B é uma técnica automatizada que requer o uso de um analisador de imagem computadorizado. Como mostra a figura 21.

Esse método quantifica a porosidade percentual da área tomando como base a refletividade da luz de um metal polido em corte transversal. O usuário desse método deve estar familiarizado com os recursos visuais de um TSCs e ser capaz de diferenciar porosidade e óxidos inerentes ao processo de revestimento por aspersão térmica.

A determinação da porosidade de um revestimento aspergido termicamente (TSCs) é por diferença de pixels da imagem convertida para 16 bits (cinza escuro e claro). Os pontos escuros contidos na imagem podem ser definidos como poros e seu cálculo pode ser definido pelo percentual da área ocupada pelos pontos pretos em relação a área analisada.

A figura 21 mostra uma imagem da superfície de uma amostra usada preparada por aspersão térmica.

Figura 21 – Imagem de uma microscopia eletrônica da superfície de uma amostra revestida por aspersão térmica de uma liga Ni/Al



Fonte: ASTM E-2109 (2021).

A Metco, 1973, desenvolveu um método por reação química que torna possível identificar se os poros existentes em revestimento em substrato ferroso são passantes. Paredes (1998), em seu estudo do revestimento de alumínio para proteção do aço contra corrosão marinha, para obter a informação se a porosidade seria passante, aplicou o teste do ferrocianato de potássio ($K_4 [Fe(CN)_6]$). Esse teste parte da aplicação de uma solução contendo 1 a 2% de Cloreto de sódio (Na Cl) e de 0,1 a 0,5% de ferrocianato de potássio. A solução é aplicada em gotas sobre a superfície revestida e, por meio de observação visual, a coloração resultante é identificada imediatamente. Caso surja uma tonalidade azul, isso indica porosidade passante, já que a presença dessa cor revela traços de ferro – componente do substrato em metais ferrosos.

3.4.3 Avaliação da dureza dos revestimentos

A dureza de um material pode ser definida como sendo a resistência que esse material apresenta se opondo à penetração. Assim, muitas vezes se procura através dos revestimentos aspergidos melhorar essa propriedade, aumentando portanto a vida útil de componentes.

Para avaliar essa propriedade nos revestimentos, são realizados testes de dureza, que podem ser por riscamento e por indentação.

A indentação baseia-se no princípio da penetração de um penetrador padronizado em uma superfície, com uma carga previamente conhecida. Onde a

marca deixada na superfície é medida com auxílio de tabelas, sendo possível obter o valor da dureza.

Como os revestimentos são obtidos por formação de lamelas sobrepostas, onde há a presença de poros e óxidos, os valores de dureza no interior de um mesmo revestimento irão variar, pois como foi dito anteriormente, os revestimentos são anisotrópicos. Atentar que os valores tanto de macro e microdureza não devem ser comparados com o material bruto de outra forma que não seja por aspersão térmica.

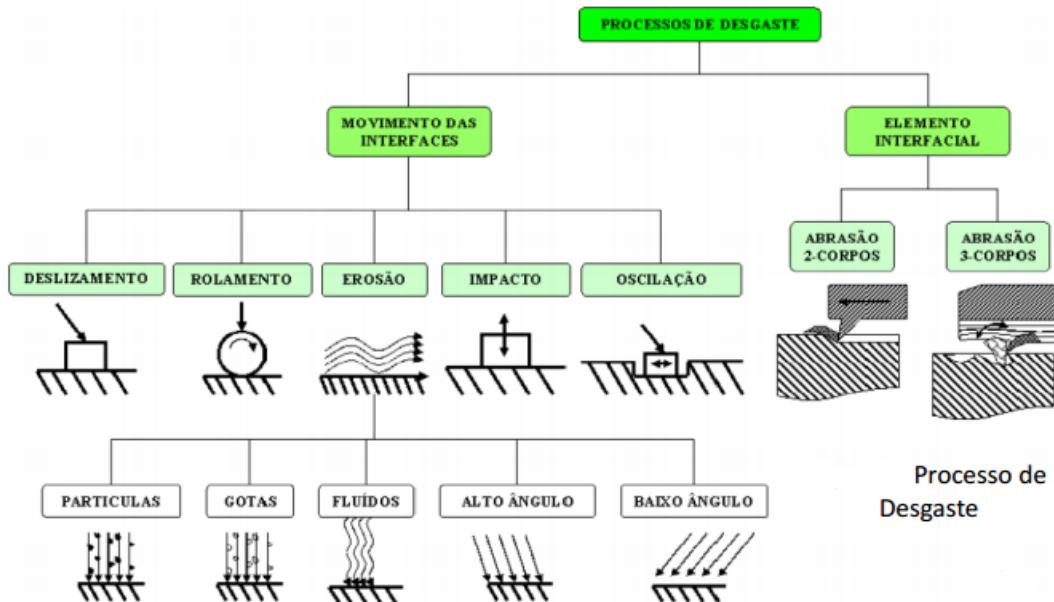
O ensaio de microdureza usualmente utilizado é o Vickers, que deve seguir o procedimento padrão conforme a norma ASTM E-384-2022.

Já para o ensaio de macrodureza, o mais indicado para revestimentos é o Rockwell conforme a norma ASTM E-18-2020, sendo o Rockwell B para menores durezas e o Rockwell C, para materiais mais duros.

3.4.4 Avaliação do desgaste nos revestimentos

Antes de abordar a avaliação de revestimentos quanto ao desgaste abrasivo é importante definir o que é desgaste, o que é tribossistema e quais tipos e mecanismos de desgaste existentes. A ASTM G77-91 define desgaste como sendo “o dano em uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de massa, devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material ou materiais”. A perda de massa da superfície sólida pode ocorrer pelo contato e movimento relativo de um sólido, ou um líquido ou gás. O desgaste está presente em diferentes situações as quais são abordados dentro de uma maior complexidade, definida pelo sistema tribológico, ou seja, o sistema que engloba a superfície que sofre o desgaste, o agente de desgaste e o meio em que as partes envolvidas estão em contato. A figura 22 mostra os principais processos de desgaste em que um componente ou equipamento pode estar submetido, incluindo o processo de desgaste por Abrasão.

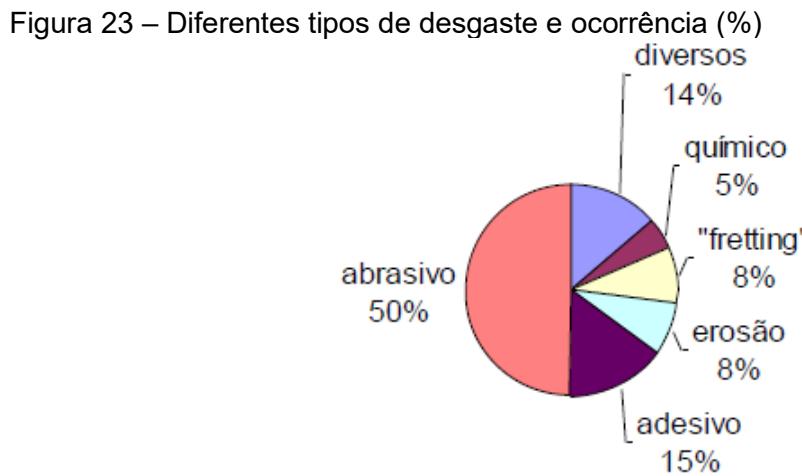
Figura 22 – Principais processos de desgaste



Fonte: Rijeza (2011).

A abrasão ocorre quando o material é retirado da superfície por ação de partículas duras. A taxa de desgaste depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo a abrasão. Pode ser entendido por expressar a ideia de ranhura por partículas duras ou ásperas sobre a superfície do material (Ball, 1986). Segundo a ASTM G40-2022, abrasão é o “desgaste devido a partículas duras ou protuberâncias duras, forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida”, pode ser interpretado também como a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície ao longo da qual se movem.

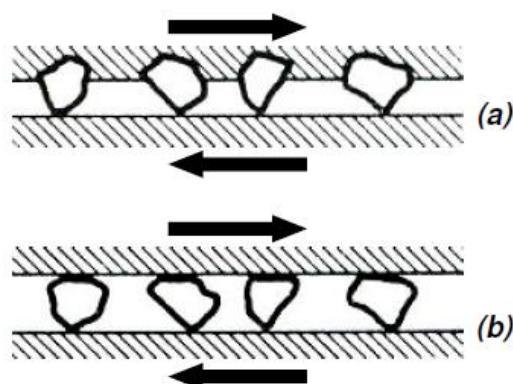
A figura 23 mostra a importância/predominância do desgaste abrasivo em relação aos demais tipos de desgaste. O desgaste abrasivo é responsável por cerca de 50% dos problemas de desgaste. Por estar presente nos diversos setores industriais, pode ser a ele atribuído a causa da parada ou diminuição da produção, que envolve elevados custos para a manutenção dos ativos das empresas, portanto se faz necessário que tenha um melhor conhecimento desse mecanismo que em alguns casos podem ser benéficos e em outros maléficos, mas de um modo geral, o desgaste é conhecido como o principal causador de danos em materiais. O desenvolvimento de materiais ou revestimentos resistentes a abrasão é de fundamental importância.



Fonte: Albertin (2003).

Tradicionalmente, o desgaste abrasivo tem sido classificado na literatura de língua inglesa de dois modos: “*Two-body abrasive wear*” ou desgaste abrasivo a dois corpos e “*Three-body abrasive wear*” ou desgaste abrasivo a três corpos (Hutchings, 1992). Contudo outras classificações com base nos mecanismos de desgaste ou pela relação de movimento relativo das partículas também atualmente utilizados: “*Grooving abrasion*” ou desgaste abrasivo por riscamento de partículas e “*Rolling abrasion*” ou desgaste abrasivo por rolamento de partículas (Trezona et al., 1999). A figura 24(a) e 24(b), mostra esquematicamente estes diferentes tipos de mecanismos de desgaste abrasivo.

Figura 24 – Desgaste abrasivo dois corpos (a) e Desgaste abrasivo três corpos (b)

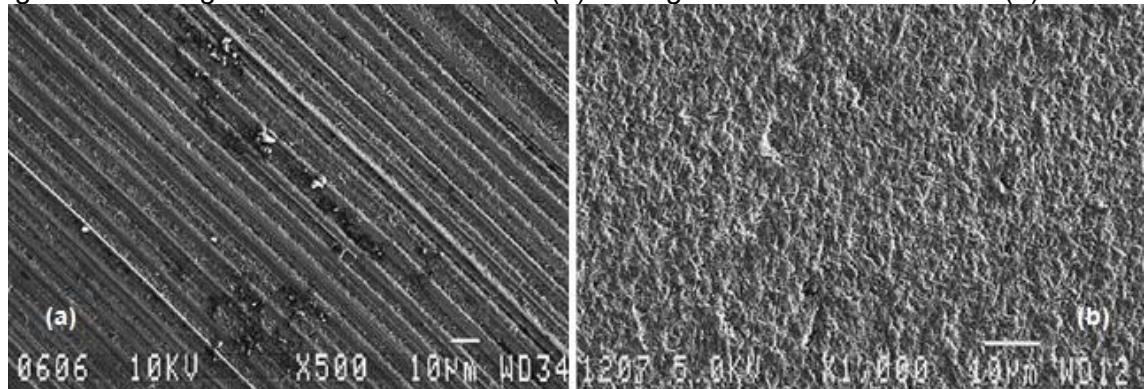


Fonte: Trezona et al. (1999).

A figura 25 mostra as diferenças das marcas de desgaste obtidas em amostras de aço ferramenta submetidas à abrasão por riscamento e abrasão por rolamento de partículas (Trezona et al., 1999). Em geral, o primeiro tipo de desgaste

abrasivo por deslizamento é uma ordem de grandeza maior quando comparado com o segundo (rolamento).

Figura 25 – Desgaste abrasivo riscamento (a) e desgaste abrasivo rolamento (b)

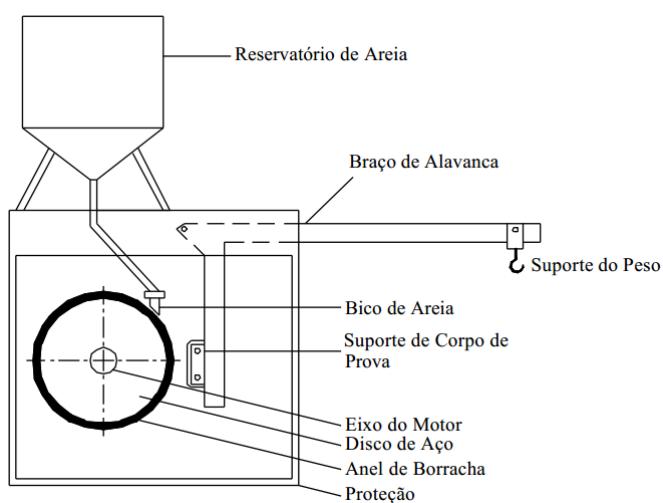


Fonte: Trezona et al. (1999).

Em geral os revestimentos duros por soldagem ou por aspersão térmica são avaliados em teste de abrasão por rolamento de partículas abrasivas. Testes como Pino sobre disco e Roda de Borracha são os mais utilizados.

O teste de Roda de Borracha é um dos mais recomendados para avaliação de materiais resistentes ao desgaste abrasivo (por exemplo, revestimentos duros). Este teste é normatizado pela ASTM G65-16. A figura 26 mostra de forma esquemática como é realizado o ensaio.

Figura 26 – Desenho esquemático do abrasômetro conforme ASTM G65-16



Fonte: ASTM G65-16 (2021).

O ensaio mede o desgaste devido a partículas duras forçadas contra e se movimentando sobre uma superfície sólida, simulando uma situação real. O

abrasivo é introduzido entre o corpo de prova, cujas dimensões padrão são: 25,4 x 76,2 mm e espessura que varia de 3,04 a 12,7 mm e uma roda de borracha girando com uma carga aplicada sobre as amostras.

Os corpos de prova são pesados antes e depois do ensaio e a perda de massa é registrada. Para comparação, é necessário converter a perda de massa em perda de volume, em milímetros cúbicos conforme a equação 2.

$$\text{Perda de volume} = (\text{perda de massa}/\text{densidade}) \times 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde:

- perda de massa = (g),
- densidade = (g/cm³).

Existem cinco (05) procedimentos distintos especificados pela norma dependendo do tipo da dureza e tipo material que está sendo avaliado (tabela 6).

Tabela 6 – Procedimentos recomendados para o ensaio de desgaste abrasivo segundo a ASTM G65-16R21

Procedimento	Carga amostra (N)	Rotações (rpm)	Abrasão linear(m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71, 8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

*Tolerância da força ± 3 N

Fonte: ASTM G-65-16(2021).

A escolha de cada procedimento depende das seguintes considerações:

- procedimento “A” – É um ensaio relativamente severo, que lista materiais de baixa a extrema resistência abrasiva. Este ensaio é particularmente útil para materiais que variam de média a extrema resistência abrasiva;
- procedimento “B” – É uma pequena variação do procedimento “A”. Deve ser usado, quando a perda de volume desenvolvida pelo procedimento A, exceder a 100 mm³, é indicado para materiais de média e baixa resistência abrasiva;
- procedimento “C” – É uma pequena variação do procedimento “A”, e deve ser usado em camadas finas;

- procedimento “D” – É utilizado em materiais de baixa resistência abrasiva, pois a força atuante sobre o corpo de prova é bem menor (45 N);
- procedimento “E” – Uma pequena variação do procedimento “B”, recomendado para materiais com média ou baixa resistência abrasiva.

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados no laboratório de tribologia instalado no INTM/UFPE. O equipamento utilizado foi um abrasômetro por roda de borracha seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM G65-16R21 (desgaste abrasivo por roda de borracha), procedimento C.

A figura 27 mostra as etapas para realização do ensaio de desgaste abrasivo.

Figura 27 - Etapas da realização ensaio de desgaste abrasivo



Fonte: Autor (2023)

3.4.5 Conceito de corrosão e ensaios para avaliação da corrosão de peças revestidas

Sabe-se que a corrosão é praticamente inevitável. Todos os materiais metálicos, com exceção de alguns metais, tais como o ouro e a platina, sofrem os efeitos da corrosão, tendo como resultado a deterioração ou destruição gradual deles. Pesquisas mostram que os custos associados à corrosão chegam a quase 5% do PIB de países desenvolvidos Gonçalves (2020). Desses custos relacionados

a corrosão, mais de 15% poderiam ser evitados, com o uso de tecnologias existentes para prevenir e controlar.

A corrosão pode ser considerada como um dos mecanismos mais comuns de desgaste no nosso dia a dia. Pode ser encontrada em todo tipo de superfície exposta ao meio ambiente. Tais como postes, janelas, tubos, tubulações, tanques, vasos, conexões, postes etc.

O fenômeno de corrosão em metais, ocorre por vários mecanismos e podem ser divididos em quatro grupos, a seguir:

- por meios aquosos (90 %);
- oxidação e corrosão quente (8%);
- em meios orgânicos (1, 8%);
- por metais líquidos (0, 2%).

A corrosão por meio aquoso é mais comum devido ao fenômeno de corrosão ocorrer no meio ambiente onde a água é o seu principal solvente (Ticianelli, 2013). A própria corrosão atmosférica tem maior incidência devido ao fenômeno da condensação da umidade sobre a superfície do metal.

Atualmente aceita-se que os dois primeiros grupos são caracterizados processos de corrosão essencialmente eletroquímicos. Já a natureza dos processos envolvendo os dois últimos grupos, não pode ser precisada, uma vez que seus mecanismos ainda não foram devidamente estabelecidos.

A corrosão eletroquímica é um processo químico onde um material metálico é corroído por uma reação eletroquímica na presença de um eletrólito, geralmente a água. É uma das formas mais comuns de corrosão, podendo ocorrer em vários materiais tais como, ferro, aço, cobre e alumínio.

Durante o processo de corrosão eletroquímica o metal é oxidado, perdendo elétrons, formando íons metálicos. Esses íons metálicos ao reagir com eletrólito formam compostos solúveis em água, tais como óxidos e hidróxidos, ao mesmo tempo o eletrólito é reduzido formando, ganhando elétrons, formando produtos como oxigênio e hidrogênio.

Na presença de agentes oxidantes, como oxigênio a corrosão eletroquímica pode ser acelerada, porém a utilização de técnicas de proteção como os revestimentos, galvanização e anodização, a corrosão eletroquímica pode ser evitada ou minimizada.

Nas indústrias os três principais tipos de corrosão eletroquímicas encontrados são: galvânica, por pites e por frestas (Gentil; Carvalho, 2022).

Corrosão galvânica ocorre quando dois metais de composição químicas diferentes são conectados eletricamente em um meio corrosivo, criando assim uma célula eletroquímica um agindo como ânodo (o que irá se corroer) e o outro como cátodo (que irá ser protegido), esse tipo de corrosão é mais comum em aplicações marítimas.

Corrosão por pites, ocorre quando pequenas cavidades são formadas na superfície do metal. À medida que essas cavidades vão se aprofundando e se estendendo pode causar falhas nos materiais e vazamentos. Esse tipo de corrosão é mais comum à presença de íons cloretos em ambientes úmidos.

Corrosão por frestas ocorre na superfície da região de contato de dois metais ou onde tenha uma fresta. Dessa forma o ambiente corrosivo é concentrado nesses locais, podendo levar a corrosão eletroquímica. Esse tipo de corrosão é mais comum ocorrer em uniões ou juntas soldadas, parafusadas ou rebitadas.

Alguns dos possíveis métodos aplicáveis na determinação da taxa de corrosão de um material metálico, são; i) perda de massa por imersão, ii) determinação da resistência a polarização e iii) conversão da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} (A/cm^2).

Os ensaios de corrosão em névoa salina e os ensaios eletroquímicos são dois métodos amplamente utilizados para avaliar o comportamento corrosivo de materiais, mas diferem bastante em metodologia, tempo de teste, tipo de informação obtida e aplicação.

Os principais ensaios realizados para avaliação da corrosão em componentes e equipamentos são regidos por normas internacionais. Os especificados pelas normas ASTM B117 / ISO 9227 referem-se aos ensaios pelo processo de névoa salina e os das normas ASTM G59-97R20 (Tafel) / ASTM G106-89R15 trata sobre os ensaios de corrosão eletroquímica. Mais adiante iremos descrever sobre cada um desses ensaios, e no final do capítulo vamos mostrar um quadro comparativo dos dois ensaios, seguindo alguns critérios relevantes na tomada de decisão para escolha do método ideal ou aquele que mais se aplica em determinadas situações de pesquisa sobre a corrosão em materiais.

3.4.6 Ensaio de corrosão por névoa salina (Salt-spray)

A corrosão é um processo que promove a deterioração de materiais metálicos, causada por reações químicas e eletrônicas com o meio ambiente. Nas indústrias Químicas e Petroquímicas, esse fenômeno ocorre com bastante frequência, pois elas manipulam produtos de diversas características, tais como, ácidos, bases, inflamáveis, sendo um dos principais fatores de redução de vida útil de componentes e equipamentos. Por esse motivo, é fundamental realizar sempre o monitoramento do estado das superfícies que têm contato com produtos agressivos e ambientes cuja atmosfera favoreça o desenvolvimento da corrosão.

A norma ABNT NBR 8094 (baseada na ASTM B117:2018) prescreve o método sobre o ensaio de nevoa salina em material metálico revestido ou não revestido. Salientamos que essa norma não especifica o tipo de corpo de prova nem os critérios de avaliação dos resultados obtidos. As dimensões dos corpos de prova têm como base a capacidade do equipamento, portanto não há dimensões padronizada.

A norma especifica a aparelhagem, que deve conter:

- câmara de ensaio com capacidade mínima de 0,4 m³;
- reservatório de solução;
- fonte de ar comprimidos;
- bicos pulverizadores;
- suporte de corpo de prova;
- dispositivo para aquecimento da câmara;
- meios para controle das condições de operação durante o ensaio.

Figura 28 – Equipamento para realização de ensaio corrosão por névoa salina



Fonte: O Autor (2025).

Este ensaio tem como objetivo monitorar a variação de massa de um corpo de prova exposto a um meio corrosivo, durante um determinado período de tempo. Além do tempo de exposição ao ambiente corrosivo, a área exposta determina a intensidade da ação do processo corrosivo, desta forma a partir da variação de massa, podemos expressar a taxa de corrosão do material (NACE, 2005; Vieira, 2013; Márquez, 2016).

A taxa de corrosão média pode ser determinada a partir da equação 3, expressa em milímetros por ano (mm/ano).

$$T_x = \frac{3,65 \cdot 10^5 \cdot \Delta_m}{A \cdot t \cdot \rho} \left(\frac{\text{mm}}{\text{ano}} \right) \quad (3)$$

Onde,

- T_x - taxa de corrosão média (mm/ano);
- Δ_m – variação da perda de massa (g) ;
- A - área total da superfície exposta ao ataque corrosivo (mm^2);
- t - tempo de exposição (dias);
- ρ – massa específica do material em exposição (g/cm³).

Segundo a NACE (2005), os valores da taxa de corrosão média é classificada pela agressividade do processo corrosivo, como: baixo, moderado, alto as

Tabela 7 – Avaliação qualitativa da taxa de corrosão em aços utilizados em dutos de petróleo

Categoria	Taxa de corrosão (mm/ano)
Baixa	< 0, 025
Moderada	0, 025 - 0, 12
Alta	0, 13 – 0, 25
Severa	>0, 25

Fonte: Nascimento (2011).

3.4.7 Ensaio corrosão eletroquímica

Uma das técnicas para obtenção da taxa de corrosão de um determinado material é a técnica eletroquímica de corrente contínua. Nesta obtém-se as curvas de polarização pontencióstática experimentais, conhecida como retas de

extrapolação de Tafel (Wolynec, 2003), Curvas de polarização potenciodinâmica (velocidade de varredura) e a Polarização Linear.

Segundo Pearson e Brook (1991) é possível produzir modelos de curvas de polarização potenciosstática experimentais, para uma ampla faixa de potencial aplicado, de um determinado sistema metal/meio a partir de curvas de polarização das reações individuais que ocorrem sobre um eletrodo.

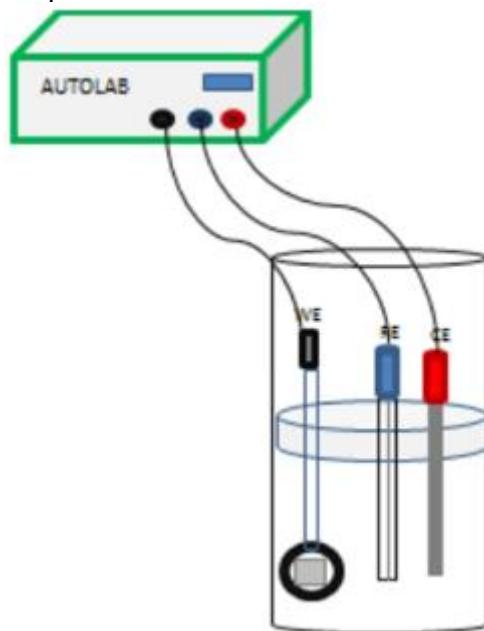
Os referidos modelos de curvas de polarização são obtidos com os pares de pontos ($\log(|I|)$, E) sendo que, para cada potencial de eletrodo aplicado (E), a corrente total (I) é obtida somando-se as correntes anódicas (positivas) e as correntes catódicas (negativas) de cada uma das reações de eletrodo que ocorrem na interface do sistema considerado.

Para isto, é necessário primeiramente identificar as reações que ocorrem na interface de um sistema metal/meio e, para cada uma das reações identificadas, é necessário conhecer a corrente de troca, as constantes de Tafel anódica e catódica e o potencial de equilíbrio. No caso de polarização por concentração, é necessário conhecer a ordem de grandeza do corrente limite. Finalmente, no caso de ocorrência de passivação é necessário conhecer a ordem de grandeza da corrente de passivação.

O Método Potenciosstato, consiste em ter como variável de controle o potencial E e não a intensidade de corrente I para variar o potencial de controle de um corpo de prova se faz necessário a utilização de um Potenciosstato. Por meio do Potenciosstato varia-se no sentido anódico ou catódico, o potencial do metal em relação ao eletrodo de referência (Nunes, 2007). Para cada valor do potencial imposto, o sistema demanda certa corrente que é suprida pelo próprio Potenciosstato. Na abordagem potenciosstática, a célula eletroquímica deve ser utilizada. É aplicada uma diferença de potencial de modo contínuo ou pulsado entre o eletrodo de trabalho e um eletrodo de referência (Jiang et al., 2018). A figura 29 mostra o esquema do ensaio do Potenciosstato com uso dos três eletrodos (Eletrodo de trabalho-WE, eletrodo de referência-ER e o contra eletrodo-CE).

- WE (*Working Electrode*- cor preta): é onde ocorre a reação de interesse;
- RE (*Reference Electrode* – cor azul): é onde ocorre uma reação conhecida em um potencial fixo;
- CE (*Counter Electrode* – cor vermelha): necessário para fechar o circuito com o WE.

Figura 29 – Esquema para o ensaio do Potenciosístato



Fonte: Márquez (2016).

A técnica de polarização linear nos permite caracterizar um material (metal) mediante a relação do potencial e da corrente, pois a obtenção das curvas de polarização é realizada sob condições em que as grandezas não variam com tempo (condições estacionárias).

As curvas de polarização correspondem a uma relação do potencial aplicado e da corrente resultante. As curvas de polarização anódica evidenciam nos estudos frente a corrosão, enquanto as curvas de polarização catódicas retratam a evolução das reações catódicas que ocorrem na superfície do material (metal).

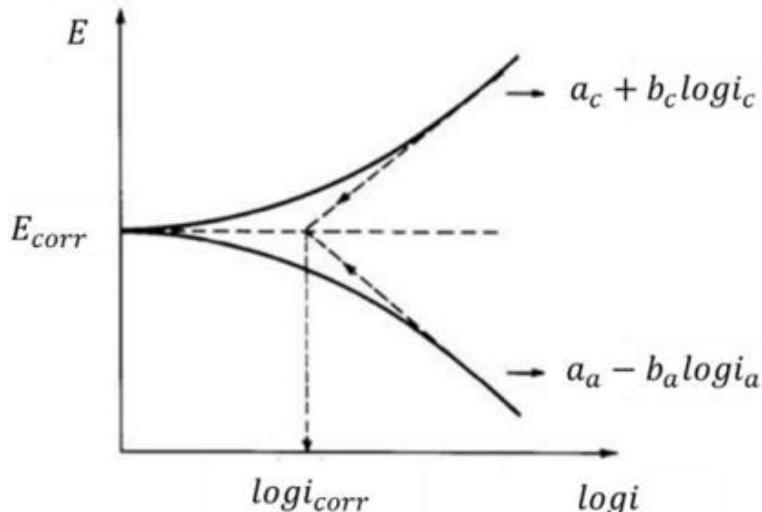
Os metais ativos, os que sofrem corrosão, apresentam curvas de polarização com um aumento contínuo da densidade de corrente, já os metais passiváveis apresentam o crescimento da densidade de corrente até um determinado valor do potencial e, posteriormente, se observa uma queda da densidade de corrente, se mantendo baixa por um determinado intervalo de potencial, correspondendo à zona de transição ativo/passivo (Princeton Applied Research, 2015).

3.4.8 Técnica de extrapolação da curva de Tafel

Técnica aplicada para medir a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), a partir da qual se calcula a taxa de corrosão de um metal. É através da curva de

Tafel que obtemos diretamente o valor da corrente de corrosão (i_{corr}) e as constantes de Tafel a_a e a_c , conforme mostra a figura 30.

Figura 30 – Curva de polarização anódica (Ia) e catódica (Ic)



Fonte: Brett (1993).

Essas constantes podem ser usadas com o valor de resistência de polarização para obter/calcular a corrente de corrosão (i_{corr}), segue abaixo as equações 4 e 5 (Santos, 2008).

$$\eta = b \log \frac{|i|}{i_0} \text{ (Tafel) ou ainda} \quad (4)$$

$$\eta = b \log|i| - b \log i_0 = a + b \log|i|, \text{ onde } a = -b \log i_0 \quad (5)$$

Sendo:

- η : sobretensão;
- i : densidade de corrente;
- a e b : parâmetros experimentais da equação de Tafel.

O quadro 1, mostra de forma resumida as principais características, comparando os critérios a serem levados em conta para tomada de decisão referente a qual ensaio é o mais apropriado na análise da corrosão em materiais metálicos.

Quadro 1 – Comparativos entre os ensaios de nevoa salina e corrosão eletroquímica

Critérios	Ensaio Nevoa Salina	Ensaio Corrosão Eletroquímica
Tipo de teste	Acelerado, empírico	Analítico, quantitativo

Ambiente utilizado	Contínuo com nevoa salina	Solução eletrolítica controlada
Duração do ensaio	24 horas até 1000 h	Minutos a horas
Resultados Obtidos	Qualitativo Visual (bolhas, oxidação, descascamentos)	Quantitativo Corrente de corrosão, Curvas de polarização, potencial de corrosão
Normas	ASTM B117 / ISO 9227	ASTM G59 (Tafel) ASTM G106 (EIS)
Vantagens	Simples, baixo custo, comparativo	Relativamente rápido, simula ambientes reais, os dados são quantitativos
Desvantagens	Não representa o ambiente real, sem dados quantitativos precisos	Custo elevado, equipamentos mais caros, requer treinamento especializado

Fonte: O Autor (2025).

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e as metodologias aplicadas no desenvolvimento da pesquisa. Serão avaliadas: a microdureza, a microestrutura, percentual de porosidade, a adesividade, a resistência ao desgaste e a corrosão de duas misturas de carbetos utilizados nos revestimentos aplicados por aspersão térmica, pelo método HVOF. A figura 31 apresenta um fluxograma da metodologia no desenvolvimento do trabalho.

Figura 31 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho



Fonte: O Autor (2021).

4.1 MATERIAIS

As matérias primas utilizadas para produção dos revestimentos foram: Duas misturas com composição diferentes contendo metal duro (WC-Co) e carbeto de cromo com adição de NiCr (Cr₃C₂+NiCr), na forma de pó, com granulometria variando de +15µm e -45µm, obtidos no mercado nacional, denominados GP-12 e GP25NC, respectivamente (certificado dos pós estão nos anexos). A escolha desses materiais foi baseada na elevação da dureza superficial e da resistência a corrosão, propriedades que irão repercutir nas suas aplicações que envolvem resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo, seja de peças novas ou recondicionadas. Os revestimentos foram aplicados em um substrato de aço carbono AISI 1020 em formato de barras chatas e barras redondas. Este material foi escolhido por ter uma dureza similar a dos aços inoxidáveis da série 300,

normalmente utilizado em fabricação de peças/componentes de equipamentos utilizados nas instalações de plantas químicas e petroquímicas em geral.

A tabela 8 mostra a composição química dos pós e a do substrato, obtidas através dos certificados fornecidos no ato da compra dos materiais.

Tabela 8 – Composição química dos materiais utilizados nos revestimentos (%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	B	Fe	Mo	W	Co
Pó de WC-Co	5,40									0, 0050		82 50	12,10
Pó de Cr ₃ -C ₂₊ NiCr	9,42				70,73	19,72				0,12			
Substrato	0,23	0,3	1,3				0,04	0, 05			98,01		

Fonte: O Autor (2025).

De forma prática, inicialmente foram revestidos os corpos de prova para realização dos ensaios mencionados no objetivo geral desse trabalho. Posteriormente revestiu-se os componentes de máquinas que tem contato com produtos químicos de características corrosiva e abrasiva, fornecidos por duas empresas parceiras (um dos objetivos específicos desse trabalho). Tais componentes foram: êmbolos de bomba de deslocamento positivo do tipo alternativa, espelhos e volutas de bombas centrífugas. Esses componentes possuem um elevado custo de aquisição, sendo nosso objetivo aumentar a vida útil dos mesmos e reduzir custo de manutenção dos equipamentos que os utilizam. As figuras 32 e 33 mostram um dos êmbolos que serão revestido e o espelho/voluta que também receberão os revestimentos.

Figura 32 – Êmbolo de uma bomba deslocamento positivo tipo alternativa



Fonte: O Autor (2025).

Figura 33 – Espelho e corpo espiral (Voluta) de bomba centrífuga que foram revestidos com as misturas de carbetos M1 e M2



Fonte: O Autor (2023).

Os revestimentos foram caracterizados por duas misturas:

- **M1:** composta por 75% de metal duro (WC-Co) e 25% de carbeto de cromo-NiCr ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$).
- **M2:** com proporções iguais (50%) de metal duro e carbeto de cromo-NiCr.

Para garantir uma homogeneização adequada, os pós foram misturados em um misturador tipo 'V' (Figura 34) por 40 minutos.

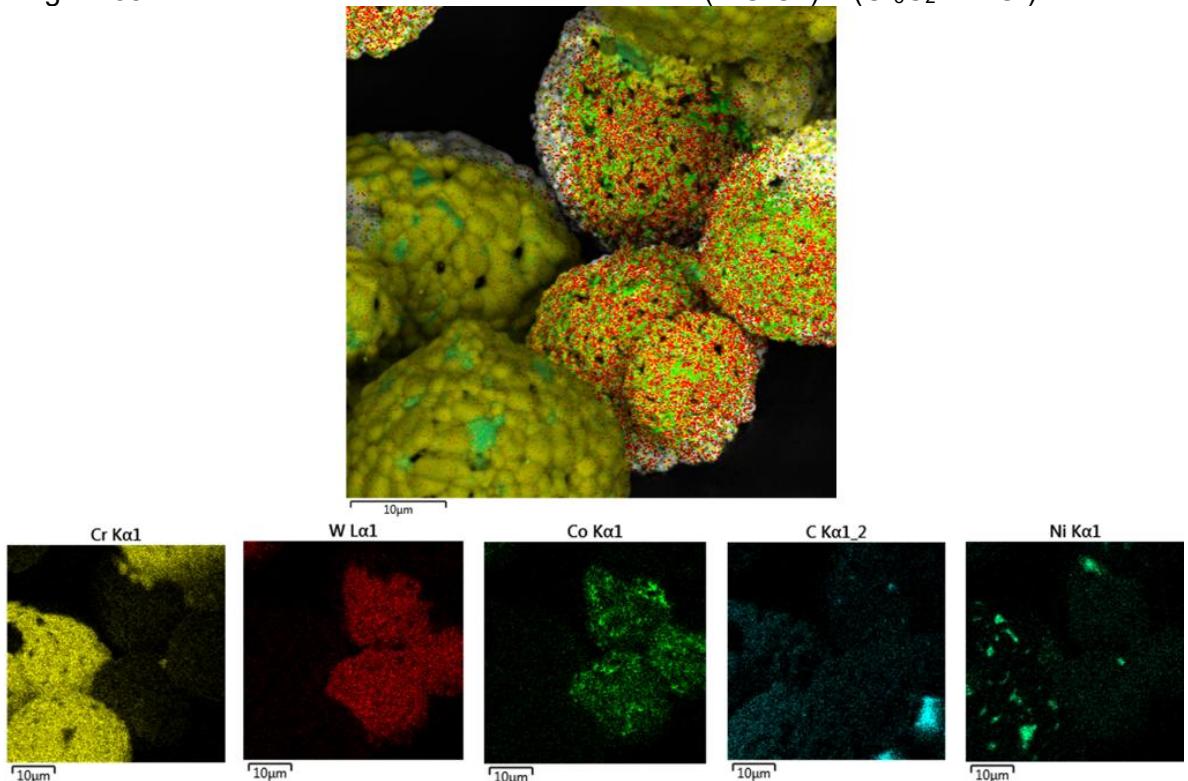
Figura 34 – Misturador em V para homogeneização das misturas M1 e M2



Fonte: O Autor (2023).

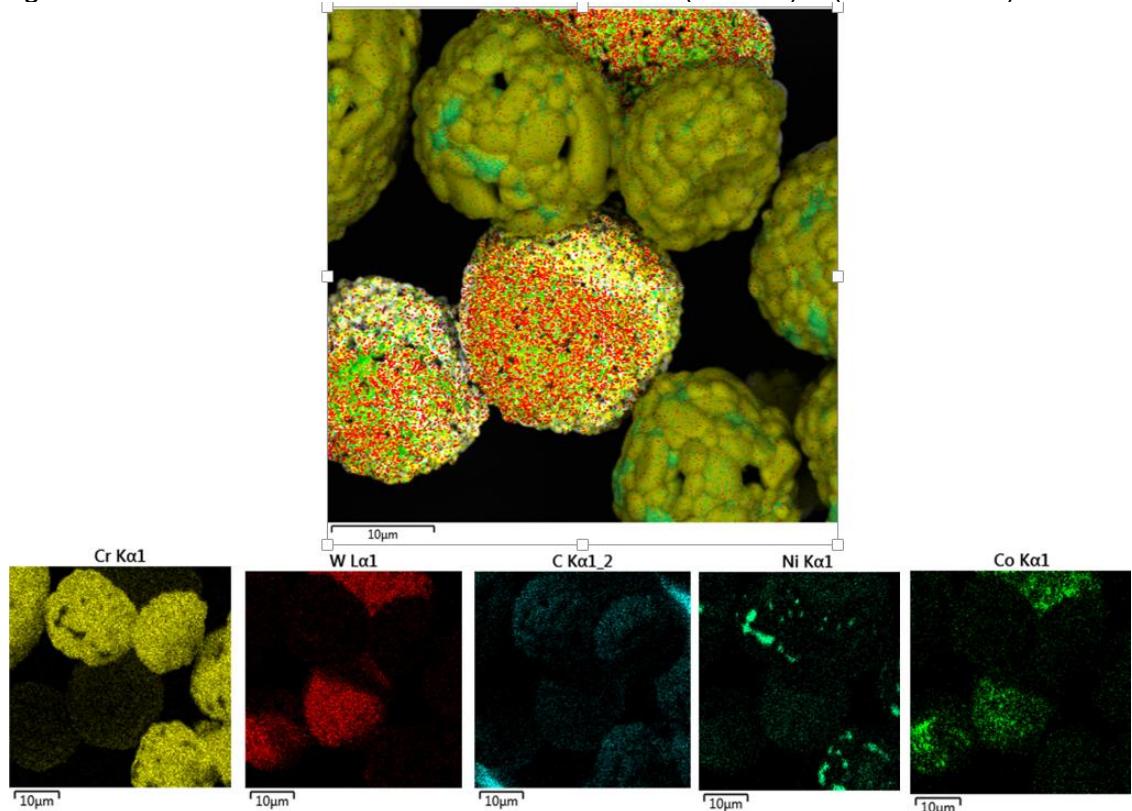
Após a homogeneização das misturas M1 e M2, realizou-se uma microscopia eletrônica de varredura – MEV/EDS para avaliação dos elementos contidos em cada mistura M1 e M2. Como mostram as figuras 35, 36 e 37(a) e 37(b).

Figura 35 – MEV com EDS da mistura M1 contendo (WC-Co) + (Cr₃C₂ – NiCr)



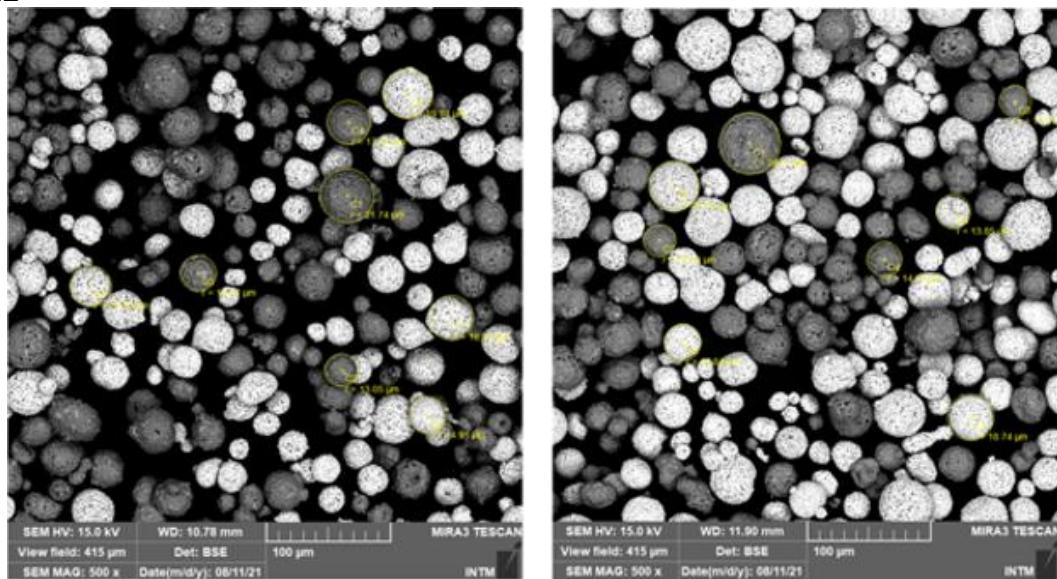
Fonte: O Autor (2025).

Figura 36 – MEV com EDS da mistura M2 contendo (WC-Co) + (Cr₃C₂ – NiCr)



Fonte: O Autor (2025).

Figuras 37(a) e 37(b) - Medições dos tamanhos das partículas dos pós das misturas M1 e M2



(a) Mistura 1

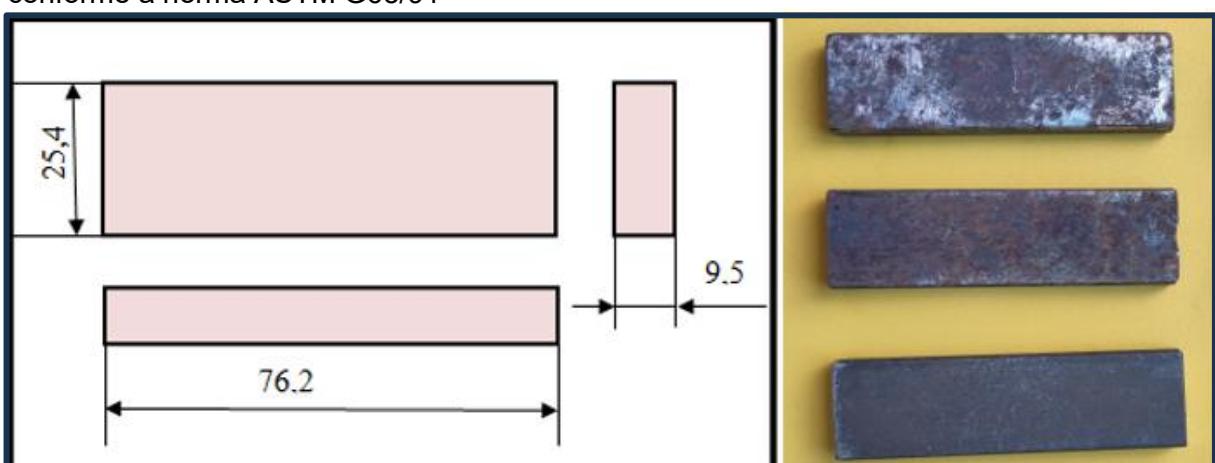
(b) Mistura 2

Fonte: O Autor (2025).

Para realizar os ensaios de caracterização microestrutural (MO e MEV) foram produzidas amostras nas dimensões 10 x 10 x 25 mm, retiradas das barras

chatas revestidas com as misturas M1 e M2. Para o teste de desgaste abrasivo (roda de borracha - Norma ASTM G65-16R21), foram confeccionados 06 corpos de prova no formato retangular nas dimensões 25,4 X 76,2 X 9,5 mm em aço carbono AISI 1020, sendo três corpos de prova revestidos com a mistura M1 e três com a mistura M2, conforme padrão estabelecido pela norma ASTM G65/91 (dimensões padrão para o ensaio desgaste abrasivo). A figura 38 mostra o desenho com as dimensões dos corpos de prova e os corpos de provas já cortados.

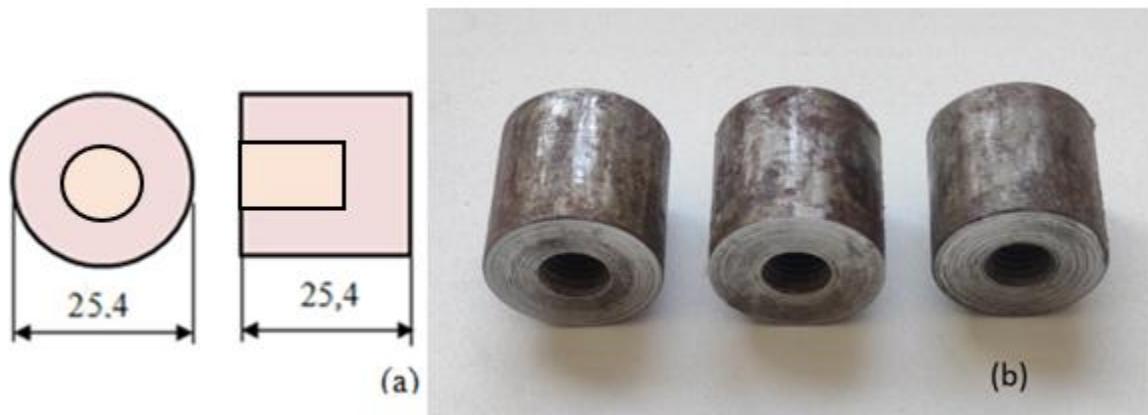
Figura 38 – Dimensões das amostras não revestidas para o ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65/91



Fonte: O Autor (2025).

Para o teste de aderência (adesividade) foram confeccionadas 06 amostras no formato cilíndrico seguindo o padrão estabelecido pela norma ASTM C633-13R21, em aço carbono SAE 1020, nas dimensões: diâmetro externo de 25,4 mm, um furo interno não passante com rosca métrica M10 e comprimento de 25,4 mm, como mostram as figuras 39(a) e 39(b).

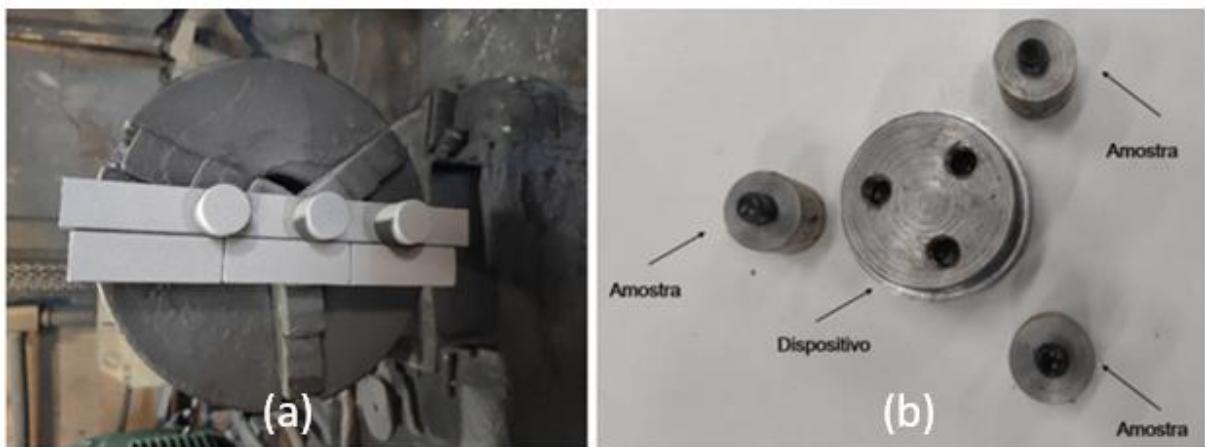
Figuras 39(a) e 39(b) – Dimensões das amostras não revestidas para o ensaio de adesividade conforme a norma ASTM C633-13R21



Fonte: O Autor (2025).

Para garantir a fixação das amostras que serão revestidas, fez-se necessário a confecção de dispositivos para fixá-las no ato da aplicação do revestimento, devido à pressão que o material aspergido atinge o substrato (amostras). As figuras 40(a) e 40(b) mostram esses dispositivos utilizados.

Figuras 40(a) e 40(b) – Dispositivos utilizados para fixação das amostras a serem revestidas



Fonte: O Autor (2025).

4.1.1 Produção dos revestimentos

Neste trabalho, utilizou-se o processo de aspersão térmica pelo processo HVOF seguindo os procedimentos e parâmetros recomendados do fabricante do equipamento de HVOF (Sulzer/Metco).

Antes da aplicação dos revestimentos, os corpos de prova foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo com óxido de alumínio (Al_2O_3) grau SA.

2.1/2 conforme a norma ISO 8501-1. Segundo Gnecco (2022) a limpeza das superfícies metálicas por meio de jateamento abrasivo é uma das formas mais eficientes para se obter boa aderência. A seguir (tabela 9) serão apresentados os parâmetros de controle utilizados no processo de aplicação dos revestimentos, conforme recomendação do fabricante do equipamento (Sulzer-Metco).

A figura 40 mostra como foi a aplicação pelo processo (HVOF) dos revestimentos das duas misturas: Mistura M1 metal duro (WC-Co) + carbeto de cromo-NiCr (Cr_3C_2 -25NiCr) na proporção de 75 e 25%, respectivamente e a mistura M2 com 50% do metal duro (WC-Co) + 50% do carbeto de cromo-NiCr (Cr_3C_2 -25NiCr) que foram obtidos na forma de pó. Esse percentual foi estabelecido devido a análise do custo / por propriedade mecânica. Haja vista que o quilograma do pó do metal duro (WC-Co) custa 25% a mais que o quilograma do pó de carbeto de cromo-NiCr. Foram confeccionados seis corpos de provas em aço carbono SAE 1020 nas dimensões 25, 4 mm de largura e 9,5 mm de espessura e comprimento de 76,5 mm, que foram utilizados para realização do ensaio de desgaste abrasivo, também confeccionamos seis corpos de provas de diâmetro 25,4 e comprimento de 25,4 mm. Todas as amostras seguiram as dimensões padronizadas conforme estabelecida pelas normas ASTM G65-16R21 (ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha) e ASTM C633-13R21 (ensaio de adesividade por tração), respectivamente. Na aplicação dos revestimentos (figura 40), o fluxo é mais concentrado em relação aos processos, arco elétrico e chama a pó. No processo HVOF as dimensões da peça ou componente a ser revestido têm forte influência na inviabilidade de revestir carbetas. As dificuldades na aplicação desse tipo de material são devidas as finas espessuras, o que pode provocar deformação do corpo de prova ocasionando o aparecimento de trincas, caso a temperatura no substrato exceda 130 °C (figura 41). Dessa forma, todo processo foi monitorado por um termômetro controlando a temperatura no substrato. Devendo o mesmo ser suspenso, quando o corpo de prova (substrato) atingir tal temperatura. Esse controle acarretou paradas constantes, que podem favorecer o aparecimento de vazios e poros entre as camadas aspergidas. Toda a aplicação dos revestimentos foi realizada de forma manual, onde a destreza do aplicador tem forte influência na qualidade do revestimento. Peças com dimensões reduzidas ou pequenas, tornam-se inviáveis a aplicação de revestimento pelo processo HVOF, devido a sua pouca massa (espessura) e dificuldade de fixação para receber o material a ser aspergido,

que neste processo atinge o substrato a uma velocidade hipersônica de aproximadamente 1200 m/s.

Figura 41 - Aplicação dos revestimentos nas amostras, das misturas M1 e M2 (WC-Co+Cr₃C₂-NiCr) pelo processo HVOF



Fonte: O Autor (2025).

Os parâmetros de controle utilizados na aplicação dos revestimentos das misturas M1 e M2 estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de controle utilizado para aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF

Descrição	Valores	Descrição	Valores
Tamanho do canhão	250 mm	Pressão Oxigênio	150 PSI
Distância aspersão	300 a 400 mm	Vazão Oxigênio	40 SCFH ⁶
Taxa alimentação	50 g/ minuto	Pressão Thermolene (propano)	100 PSI
Pressão gás arraste (N ₂)	100 PSI	Vazão Thermolene (propano)	40 SCFH
Vazão gás arraste (N ₂)	30 SCFH	Pressão ar comprimido	100 PSI
Pistola (Tocha)	TAFA JP- 5000	Vazão ar comprimido	60 SCFH

Fonte: O Autor (2025).

⁶ Standard Cubic Feet Per Hour (SCFH) – normal pé cúbico por hora

A figura 42 mostra detalhes da pistola/tocha (Diamond Jet DJ Gun) utilizada na aplicação dos revestimentos pelo processo HVOF.

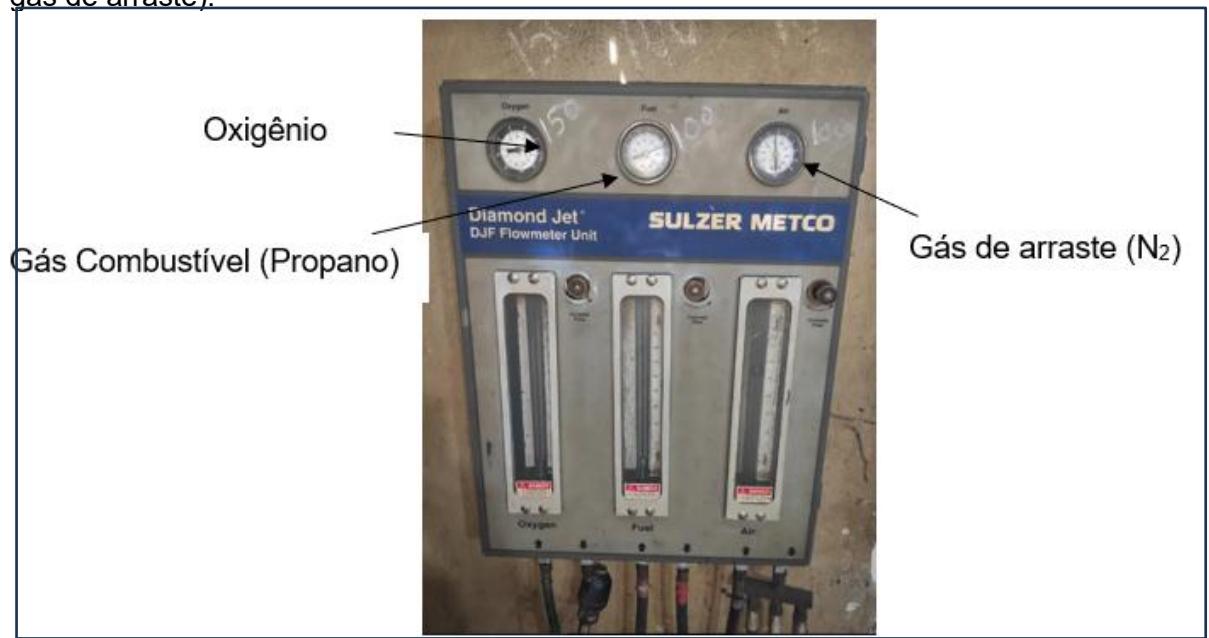
Figura 42 – Imagem da pistola/tocha utilizada na aplicação dos revestimentos por aspersão térmica através do processo HVOF



Fonte: O Autor (2021).

A figura 43 mostra o painel onde foi realizado os controles de vazão e pressão informados na tabela 9.

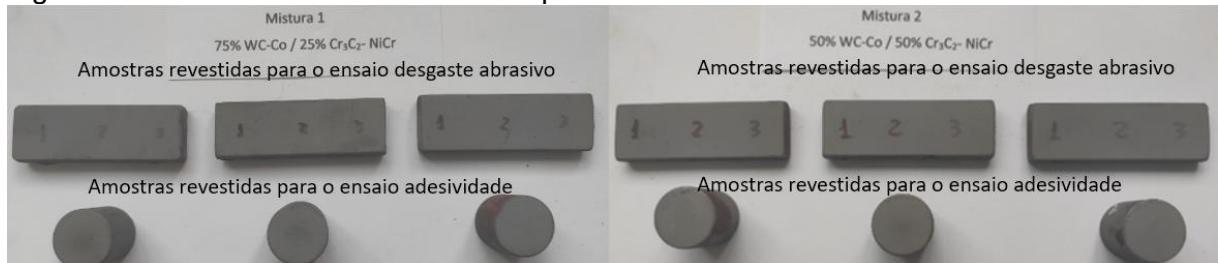
Figura 43 – Painel de controle das variáveis do processo HVOF (oxigênio, combustível e gás de arraste).



Fonte: O Autor (2025).

A figura 44 mostra os corpos de provas que foram revestidos com as duas misturas M1 e M2 de WC-Co + Cr₃C₂-NiCr.

Figura 44 – Amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2



Fonte: O Autor (2025).

Os revestimentos produzidos foram caracterizados metalográficamente e avaliados quanto à dureza, porosidade, resistência ao desgaste abrasivo, adesividade no substrato e corrosão (objetivo geral do trabalho).

4.1.2 Metalografia dos revestimentos

Para a caracterização metalográfica dos revestimentos utilizou-se dos recursos disponíveis da Microscopias Ótica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS. Na preparação das três amostras para estas análises, os corpos de prova foram cortados, embutidos, lixados e polidos. Esta etapa do trabalho foi realizada no laboratório de preparação metalográfica e análise de microscopia do INTM/UFPE

4.1.3 Ensaio de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimentos de materiais da UFPE- INTM/UFPE.

Neste experimento as medições foram realizadas na secção transversal, na direção perpendicular a superfície, o que se justifica um valor de microdureza maior. Nos ensaios de microdureza a preparação da superfície é fundamental. A natureza dos abrasivos utilizados no lixamento pode influenciar nos valores obtidos.

Para efeito comparativo, foram realizadas 30 identações para as medições das microdurezas, sendo 10 no revestimento, 10 na interface revestimento/substrato e 10 no substrato.

As identações foram realizadas na forma de linha a fim de se obter um mapeamento da microdureza nos revestimentos denominados M1 e M2.

4.1.4 Medição da porosidade dos revestimentos

A medição da porosidade foi realizada através da diferença de fase com o auxílio da microscopia ótica. Para essa finalidade, foram dimensionadas aleatoriamente três áreas distintas em cada amostra e por coloração contado o percentual de pixels de uma determinada cor por unidade de área. A norma ASTM E-2109-21 orienta esse tipo de avaliação (diferença de coloração) para determinação de poros, porém ela comenta que esse procedimento não pode ser utilizado para caracterizar limite de aceitabilidade para qualquer valor obtido.

4.1.5 Teste de desgaste abrasivo conforme norma ASTM G-65-16R21

Os testes de desgaste abrasivo foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais – INTM/UFPE. O equipamento utilizado nestes testes foi o Abrasômetro por Roda de Borracha, de acordo com a norma ASTM G65-16R21. A figura 45 mostra um ensaio típico neste equipamento conforme especificado pela norma.

Figura 45 – Imagem de um abrasômetro por roda de borracha para realização de ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65-16



Fonte: CISP (2023).

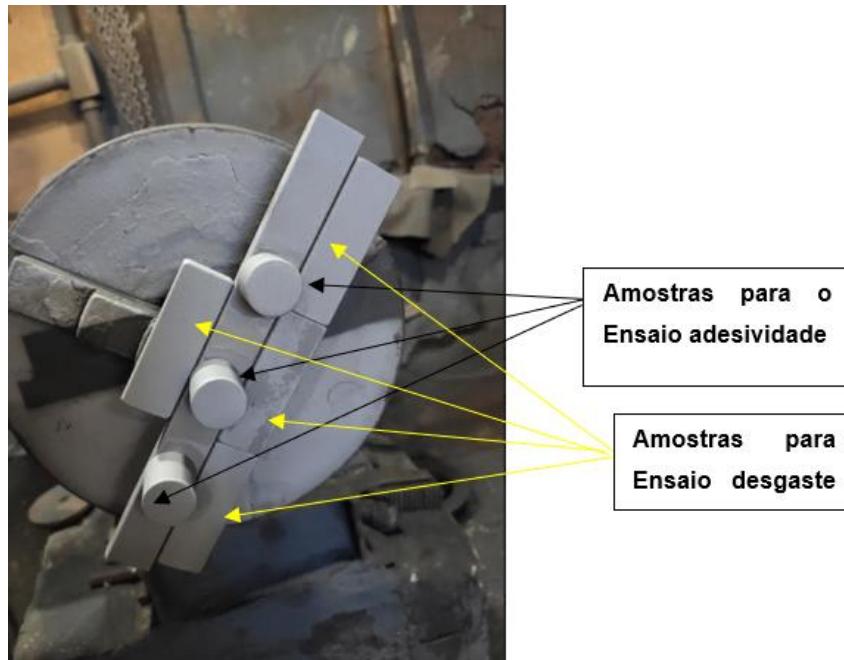
O abrasômetro é constituído de uma roda metálica revestida em uma borracha e dureza padronizada de 64 Shore A. A amostra é pressionada contra a roda através de um braço articulado e o abrasivo introduzido na região entre

amostra/roda de borracha. A diferença de pesagem das amostras antes e após ensaio é utilizada como medida do desgaste. Os testes de abrasão são reportados por perda de volume por milímetros cúbicos. Materiais com maior resistência abrasiva apresentarão menor perda de volume.

As condições de teste escolhidas foram de acordo com a norma ASTM G65-16, como segue: Procedimento C (é uma variação do procedimento A, cujos resultados são equivalentes, guardada as devidas proporções. O Abrasivo utilizado foi areia (SiO_2) de granulometria variando de 0,212 a 0,300mm, com uma vazão de 320 g/min.

As amostras revestidas utilizadas nestes testes de abrasão foram obtidas de uma barra chata previamente revestida que foram cortadas, em três peças, para cada revestimento, nas dimensões finais padronizadas para realização dos ensaios de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65-16. A figura 46 mostra as três barras chatas revestidas e as amostras que foram submetidas ao ensaio de aderência dos revestimentos.

Figura 46 – Amostras revestidas prontas para realização dos ensaios de desgaste abrasivo e adesividade



Fonte: O Autor (2025).

A figura 47 mostra, de forma resumida, a sequência de realização do ensaio de desgaste abrasivo conforme as orientações da norma ASTM G65-16.

Figura 47 – Sequência da realização do ensaio de desgaste abrasivo



Fonte: O Autor (2025).

Inicialmente as amostras foram lavadas com detergente neutro, em seguida passaram por mais uma limpeza, desta vez, com álcool isopropílico. A partir dessa etapa a amostra passou por um banho ultrassônico de cinco minutos, para em seguida ser pesada na balança de precisão com uma resolução de $\pm 0,0001\text{g}$, onde foi registrada a massa inicial da amostra. Em seguida, a amostra foi levada para o abrasômetro sendo transportada por uma pinça, evitando o contato com a pele das mãos.

Após o ensaio, a amostra passou pelo mesmo processo de limpeza informado anteriormente, concluindo o ciclo do ensaio com a pesagem final. De posse desse resultado por diferença de massa, utilizou-se da equação 5 para calcular a perda de volume.

$$\text{Perda de volume} = (\text{perda de massa} / \rho_{\text{mist}}) \times 1000 [\text{mm}^3] \quad (5)$$

Onde:

- Perda de massa = (g);
- Densidade da mistura ($\rho_{\text{mist.}}$) = (g/cm^3).

Como os revestimentos foram de duas misturas de materiais de diferentes densidades, calculou-se as densidades de cada mistura seguindo as orientações de Callister, Rethwisch (2018), utilizando a **média harmônica ponderada**⁷ conforme equação 6.

$$\frac{1}{\rho_{\text{mist.}}} = \frac{f_1}{\rho_1} + \frac{f_2}{\rho_2} \quad (6)$$

⁷ A afirmação de que a densidade de uma mistura de materiais é calculada pela média harmônica das densidades (quando se conhece a fração mássica) é um princípio fundamental da física e da química, especificamente da termodinâmica de misturas e da ciência dos materiais.

Onde:

f_1 e f_2 , são as frações mássicas de cada componente (por exemplo: 0,50 para cada um, no caso de 50%).

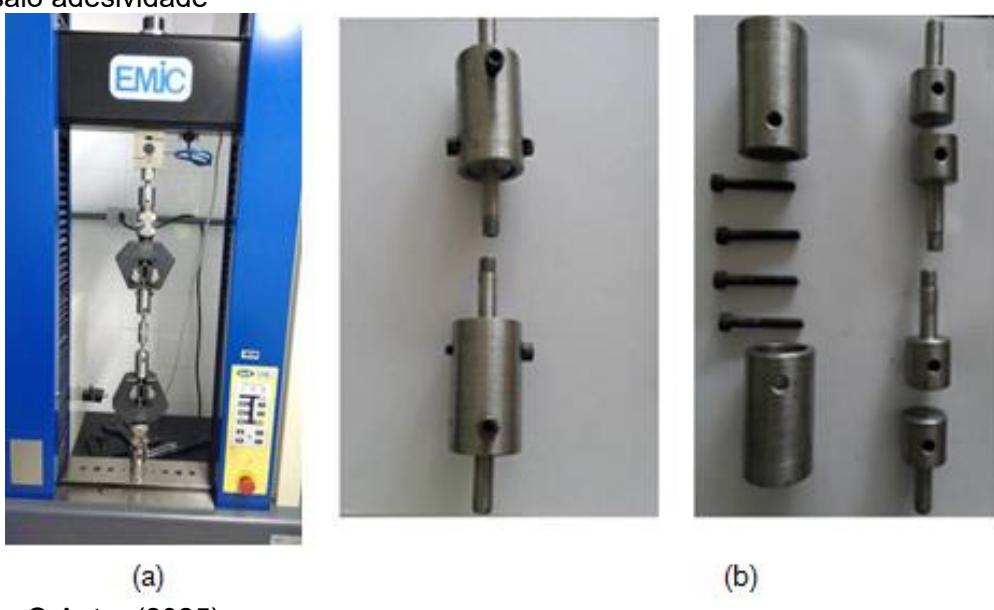
ρ_1 e ρ_2 as densidades de cada componente da mistura metal duro e Cr₃C₂.

ρ_{mist} é a densidade de cada mistura

4.1.6 Teste de adesividade

Para o teste de adesividade foi confeccionado os dispositivos especificados pela norma ASTM C633-13R21. A obtenção da adesividade foi através do ensaio de tração realizado pelo equipamento modelo DL 10000 fabricante EMIC com capacidade de carga máxima de 100 KN existente no laboratório de ensaios dinâmicos, instalado no INTM da UFPE. A figura 48(a) mostra o referido equipamento com a montagem das amostras para o teste de adesividade por tração. Inicialmente houve a necessidade de confeccionar um dispositivo conforme recomendação da norma ASTM C633-13R21, como mostra a figura 48(b).

Figuras 48(a) e 48(b) – Imagem da máquina de tração montada com as amostras 48(a) e o dispositivo compensador conforme a norma ASTM C633-13R21 48(b) para a realização do ensaio adesividade



Fonte: O Autor (2025).

Além da máquina e dispositivos de fixação, a preparação das amostras foi de fundamental importância para uma correta caracterização da adesividade dos revestimentos. A Sociedade de Aspersão Térmica, orienta um procedimento de colagem para atingir o desempenho esperado, pois as amostras devem estar apoiadas formando um ângulo de 30° com o eixo vertical em um perfil em "V" (figura 49), visando garantir a carga no adesivo e a melhor concentricidade possível, pois a tendência é que uma das peças se desloque devida a viscosidade do adesivo.

Para a colagem das amostras revestidas, utilizou-se do adesivo Araldite profissional 24 horas, da TEKBOND, cujo tempo total de cura é de 24 horas. A opção por esse adesivo foi devido a recomendação do seu uso, no trabalho realizado por Andreia (2018), que obteve bom rendimento. Utilizou-se também o adesivo Scotch Weld DP 460 da 3M, ele foi utilizado por Lima e Trevizan (1999) na realização do ensaio de tração, para medir o desempenho desses adesivos. O adesivo da 3M apresentou valores de tensão de ruptura e carga de ruptura superior ao adesivo Araldite 24h. As figuras 49(a) e 49(b) mostram, respectivamente, os adesivos utilizados e o dispositivo recomendado pela Sociedade de Aspersão Térmica.

Figuras 49(a) e 49(b) - Adesivos utilizados na colagem das amostras para realização do ensaio de adesividade



Fonte: O Autor (2025).

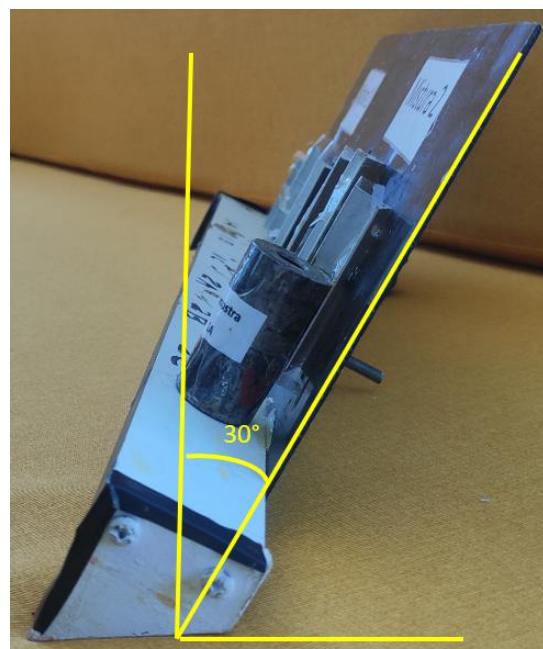
A confecção de um dispositivo foi de suma importância para garantir a concentricidade das duas peças evitando, desta forma, no ato da realização do ensaio, uma possível torção do conjunto montado. Já a inclinação de 30° com o eixo vertical, como mostram as figuras 50 e 51, possibilitou a diminuição do peso da amostra, evitando uma carga no material sobre o adesivo, diminuindo desta forma a camada adesiva entre as amostras coladas.

Figura 50 – Dispositivo de apoio das amostras na etapa de colagem



Fonte: O Autor (2025).

Figura 51 – Detalhe do dispositivo de apoio das amostras na etapa de colagem



Fonte: O Autor (2025).

A tabela 10 mostra as dimensões das amostras antes e depois de serem revestidas, caracterizando as dimensões das camadas obtidas nos revestimentos.

Tabela 10 – Dimensões das amostras antes e após aplicação dos revestimentos

Dimensões Amostras (mm)	Antes e Após Revestimento (mm)	Camada (mm)
Amostra 1A	25,44	0,40
Amostra 1B	25,44	0,39
Amostra 1C	25,43	0,37
Amostra 2A	25,28	0,67
Amostra 2B	25,40	0,63
Amostra 2C	25,60	0,59

Fonte: O Autor (2025).

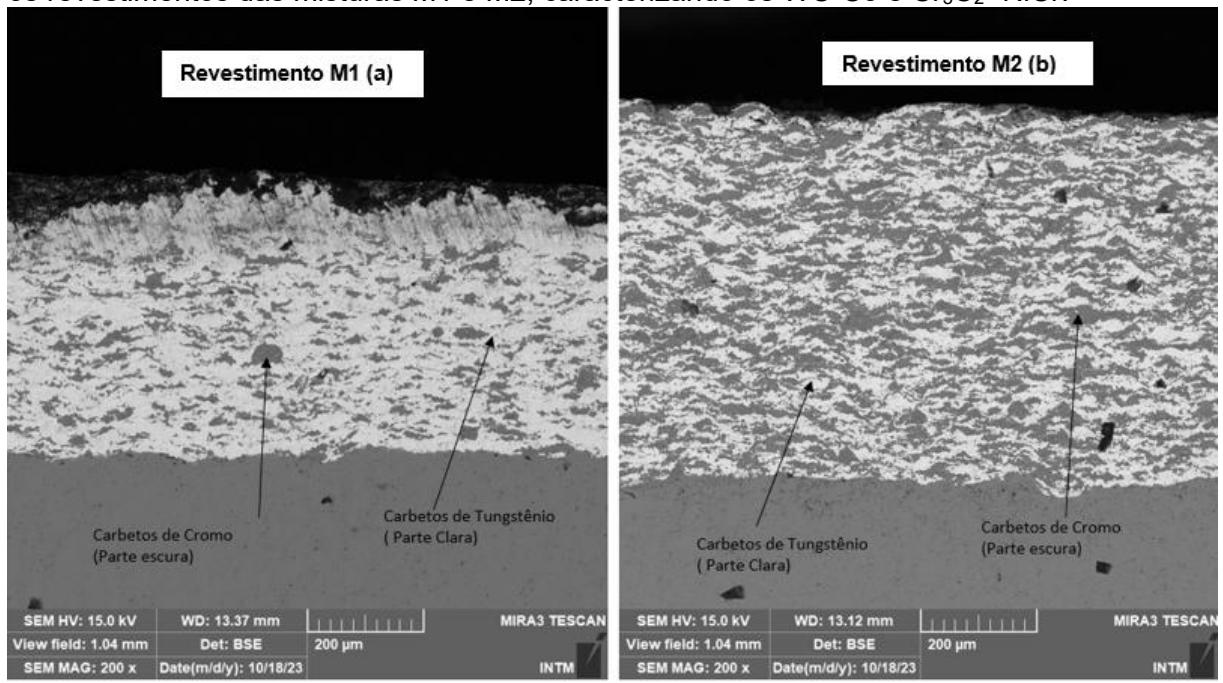
Essas medições foram realizadas com um paquímetro digital com resolução de $\pm 0,01\text{mm}$. Em resultados e discussão serão mostradas essas medições com maior precisão, através das imagens obtidas pelas microscopias (MEV), com uso do software de código aberto denominado image J.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DOS REVESTIMENTOS

As aplicações das misturas M1 e M2 foram realizadas por aspersão térmica pelo método HVOF, mostrado na tabela 1 e nas figuras 41 e 42. Foi caracterizada a boa homogeneização das misturas realizadas com o equipamento denominado de misturador em V. Nas figuras 52(a) e 52(b) podemos observar as proporções (misturas M1 e M2), onde as partes claras se constituem do metal duro (WC-Co) e as partes escuras, constituem de Carbeto de Cromo-NiCr ($\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{NiCr}$).

Figuras 52(a) e 52(b) – Microscopia Eletrônica de Varredura dos revestimentos, mostra os revestimentos das misturas M1 e M2, caracterizando os WC-Co e Cr_3C_2 -NiCr.

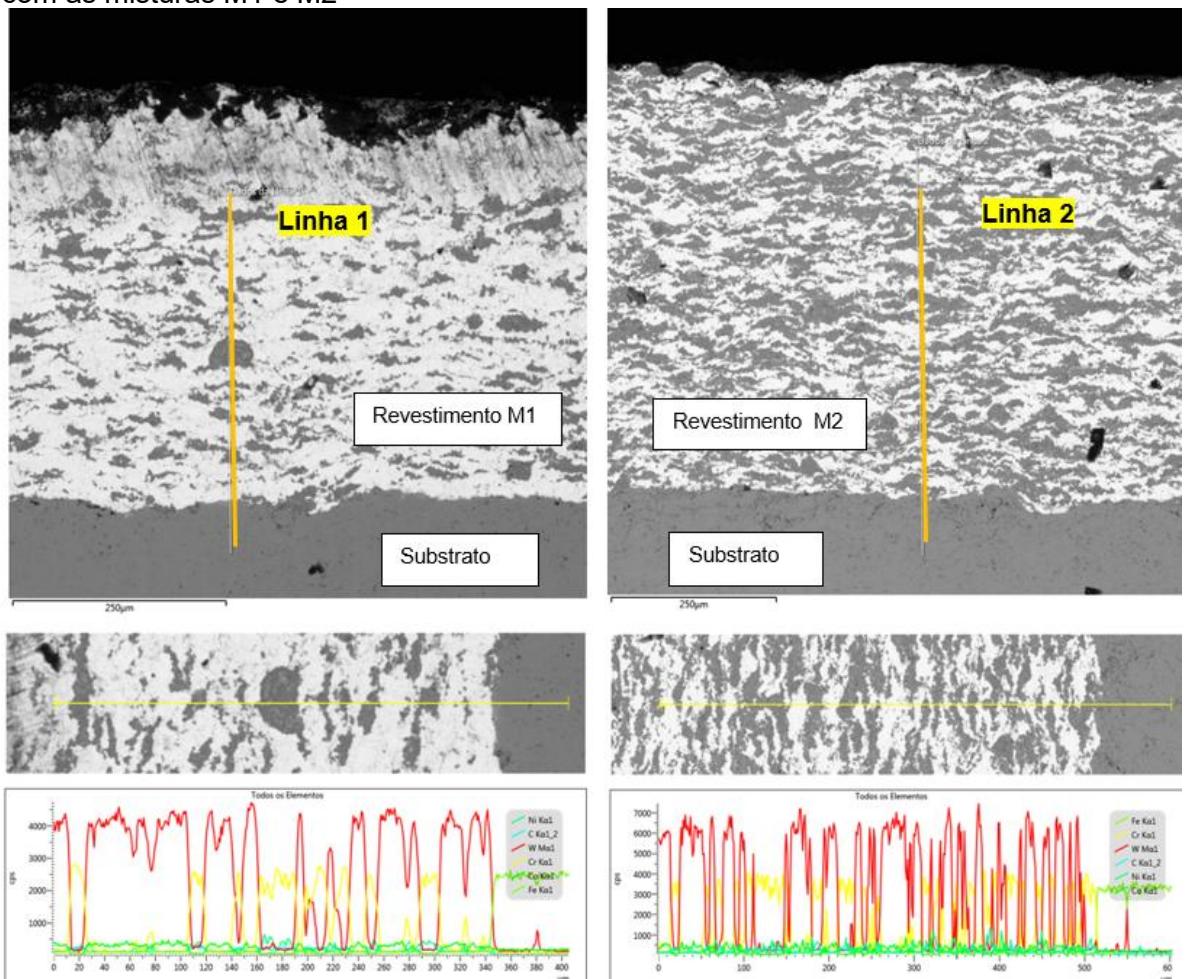


Fonte: O Autor (2025).

A figura 53 mostra imagens do MEV das superfícies das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2, onde realizou-se um mapeamento em linha com o objetivo de visualização dos elementos químicos contidos nos respectivos revestimentos. Essas imagens nos mostraram de forma clara a proporção de Carbeto de Tungstênio (cor branca) e Carbeto de Cromo (cor cinza) de cada um deles. Vale salientar que no final da linha do mapeamento, mostra a predominância

de ferro e carbono, pois trata-se do material metal base (substrato) utilizado, que é o aço carbono SAE 1020.

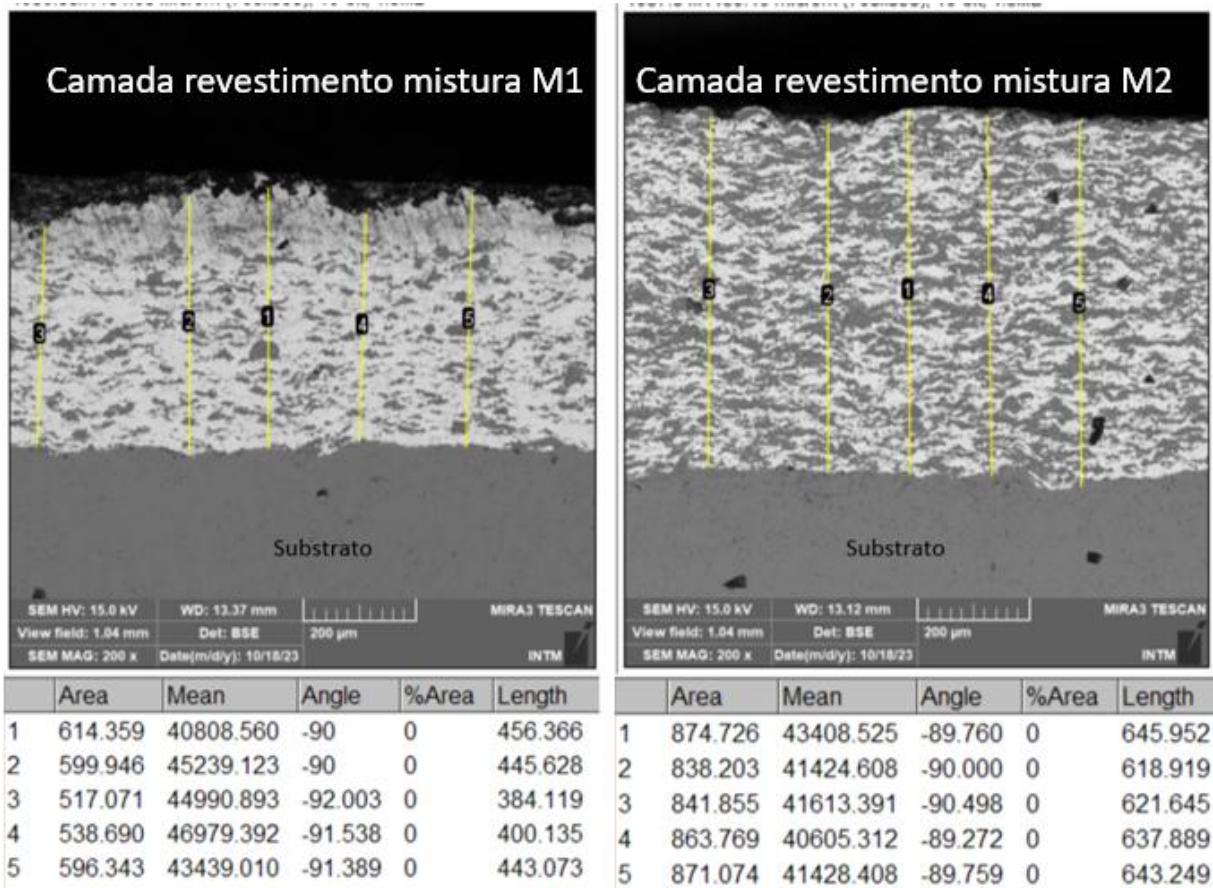
Figura 53 – Imagem do mapeamento em linha das superfícies das amostras revestidas com as misturas M1 e M2



Fonte: O Autor (2023).

Foi realizada através das imagens obtidas na microscopia eletronica de varredura-MEV e com o auxilio do software Image J, cinco medições das espessuras das camadas obtidas em cada revestimento. Essas medições podem serem vistas nas figuras 54(a) e 54(b).

Figuras 54(a) e 54(b) – Imagens das medições das camadas revestidas (μm) das misturas M1 e M2



Fonte: O Autor (2024).

Essa variação nas medições é explicada pelo fato dos revestimentos terem sido aplicado por um processo manual, como mostra a figura 55, onde a dextreza/habilidade do aplicador influencia na qualidade da aplicação. Desde a distância da chama a peça e a velocidade de deslocamento da pistola ao longo do comprimento da região a ser revestida.

Figura 55 – Aplicação dos revestimentos por aspersão térmica através do processo manual



Fonte: O Autor (2024).

A espessura média obtida no revestimento M1 foi $425\mu\text{m}$. Já no segundo revestimento M2, a espessura média obtida foi maior com um valor de $633\mu\text{m}$. Vale salientar que esses valores obtidos foram medidos na superfície bruta dos corpos de provas sem terem realizado a usinagem de retificação. Os revestimentos obtidos por aspersão térmica em componentes de máquinas de formas complexas, dificilmente se consegue realizar algum tipo de usinagem para uniformidade da superfície da camada revestida. Porém nos, êmbolos e espelhos de bombas, foi possível realizar a usinagem final pelo processo de retificação, utilizando rebolos diamantados. Pelo processo HVOF, pode-se alcançar espessuras de camada de até $600\mu\text{m}$ (Rijeza, 2011). Dependendo da região a ser revestida, valores superiores a este podem ocasionar trincas nos revestimentos devido a dilatações térmicas, entre o revestimento e o material da peça (substrato). Toda execução da aplicação dos revestimentos foi monitorada a temperatura na peça (substrato) para não exceder 130°C . Esse acompanhamento é realizado justamente para evitar o aparecimento de trincas, inutilizando dessa forma o revestimento. A figura 56 mostra esse controle sendo realizado na aplicação dos carbetas das Misturas M1 e M2 nos êmbolos de uma bomba de deslocamento positivo de uma empresa do ramo químico, parceira nesse estudo.

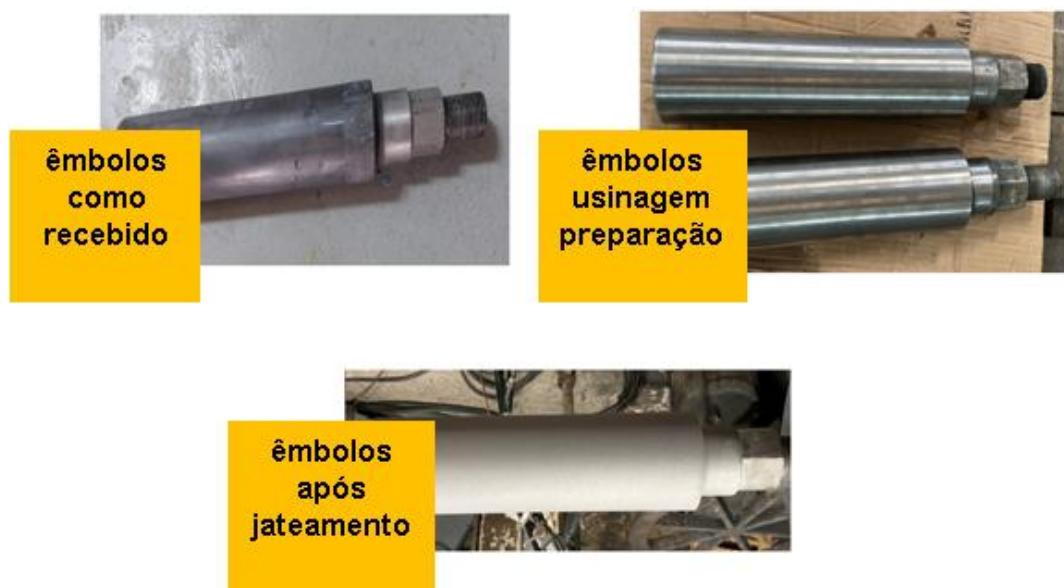
Figura 56 – A imagem mostra o monitoramento da temperatura durante a aplicação dos revestimentos em um êmbolo.



Fonte: O Autor (2024).

A figura 57 mostra as etapas de preparação que foi seguida para realização dos revestimentos dos êmbolos da bomba de deslocamento positivo da empresa 1 parceira neste trabalho.

Figura 57 – A imagem mostra a sequência de preparação dos êmbolos para a aplicação dos revestimentos.



Fonte: O Autor (2024).

A figura 58 mostra os êmbolos já revestidos e retificados nas dimensões finais para uso na bomba, sendo submetido à medição da rugosidade recomendada

pelo fabricante do equipamento. Os resultados das medições da rugosidade obtida no acabamento final das superfícies dos êmbolos M1 e M2, foram $R_a = 0,054\mu\text{m}$ e $R_a = 0,067\mu\text{m}$, respectivamente, em conformidade com a peça original do fabricante do equipamento.

Figura 58 – Imagem dos êmbolos revestidos por aspersão térmica para realização das medições da rugosidade.



Fonte: O Autor (2024).

Na sequência foi realizado, o revestimento de uma placa de vedação (espelho) de uma bomba centrífuga. A preparação da peça e as demais etapas realizada para aplicação do revestimento são mostradas nas figuras 59, 60 e 61.

Figura 59 – Imagem da placa de vedação (espelho) antes do jateamento abrasivo e receber o revestimento



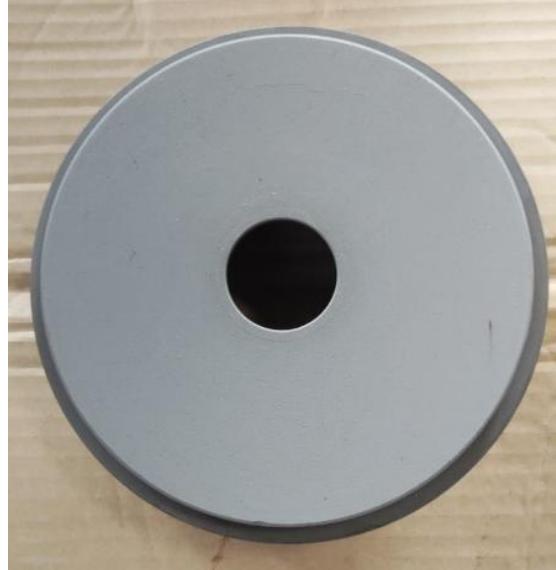
Fonte: O Autor (2024).

Figura 60 – Imagem da aplicação do revestimento na placa de vedação (espelho)



Fonte: O Autor (2024).

Figura 61 – Imagem da placa de vedação (espelho) após aplicação revestimento



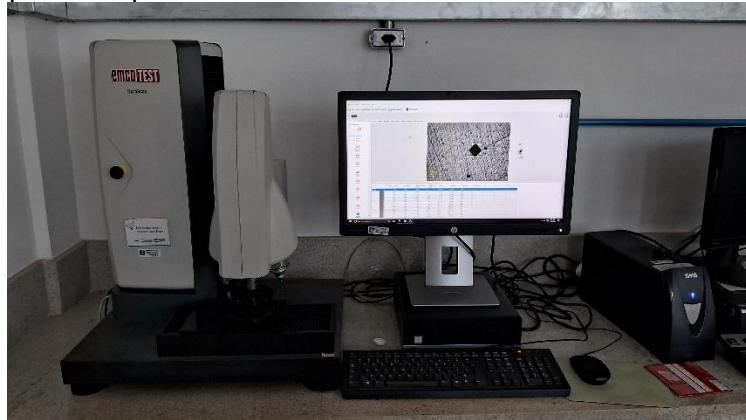
Fonte: O Autor (2024).

No caso dessa placa de vedação (espelho), após aplicação do revestimento foi realizada a usinagem pelo processo retificação, para acabamento, pois a rugosidade influencia no rendimento de bombeamento do equipamento. Para essa usinagem utilizou-se rebolos diamantados devido à dureza da superfície que foi revestida

5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS

O ensaio de microdureza foi realizado conforme a norma ASTM E384-16 na área da secção transversal dos revestimentos e na face (local de contato em operação). Como os revestimentos aspergidos termicamente são anisotrópicos foram realizadas 30 medições de dureza em linha em regiões distintas da secção transversal de cada amostra. Por se tratar de ensaio com cargas baixas (menor ou igual a 1kgf) as identações são microscópicas. A figura 62 mostra a imagem do equipamento utilizado nesse ensaio. Trata-se do DuraScan da Emcotest.

Figura 62 – Equipamento para ensaio de microdureza Vickers

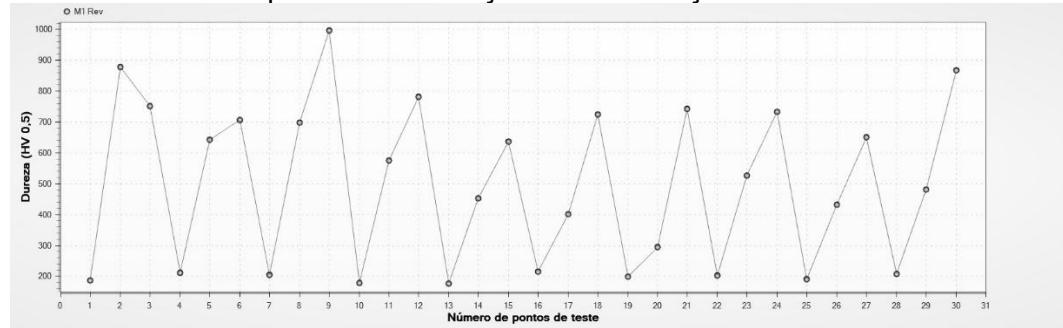


Fonte: O Autor (2024).

A carga utilizada foi 0,5kg. Com os valores obtidos, foram gerados gráficos para verificar o comportamento da microdureza nos dois tipos de revestimentos, M1 e M2.

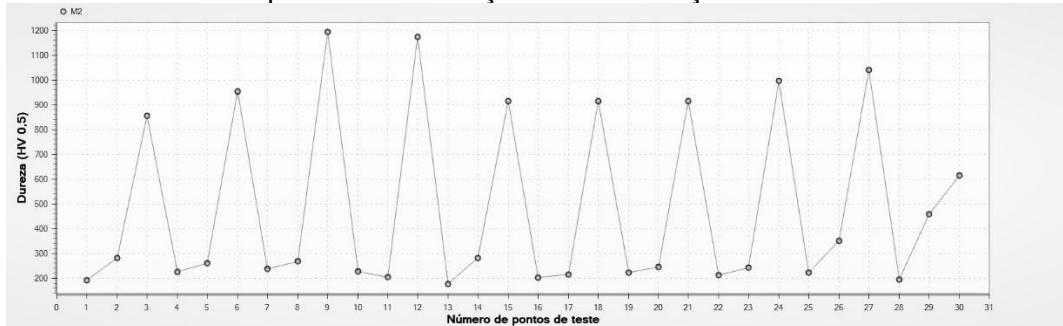
As figuras 63 e 64 mostram os 30 pontos das identações realizadas nos revestimentos, sendo 10 pontos no substrato (aço SAE1020), 10 pontos na interface (região intermediária do gráfico) e os 10 pontos restantes no próprio revestimento.

Figura 63 – Gráfico dos pontos das medições das identações revestimento M1



Fonte: O Autor (2024).

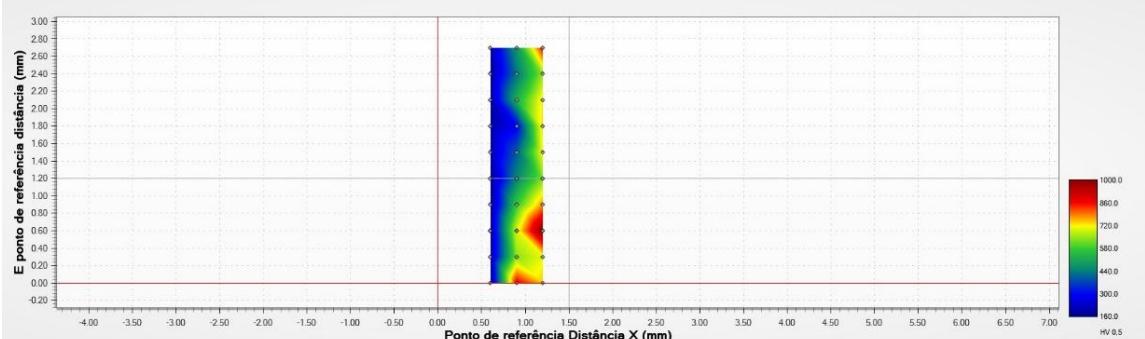
Figura 64 – Gráfico dos pontos das medições das identações revestimento M2



Fonte: O Autor (2024).

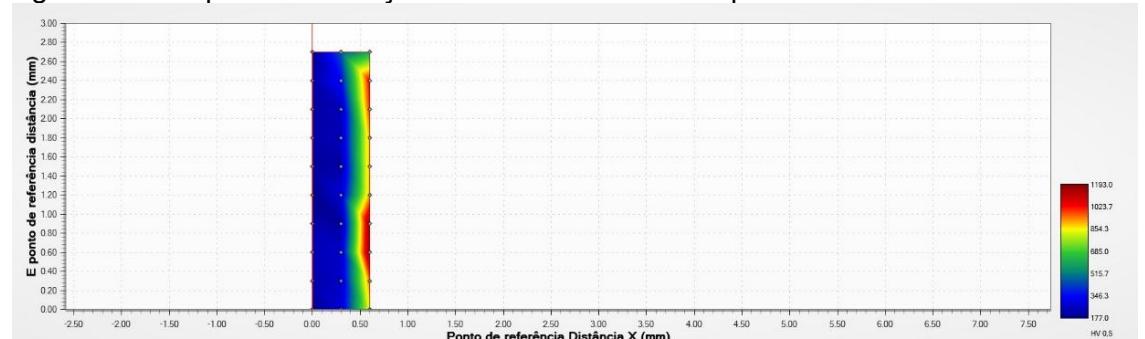
As figuras 65 e 66 mostram os mapas das identações realizadas nos revestimentos M1 e M2, vale salientar que a região do revestimento é onde encontramos os maiores valores para microdureza Vickers.

Figura 65 – Mapa das identações realizadas sobre a superfície do revestimento M1



Fonte: O Autor (2024).

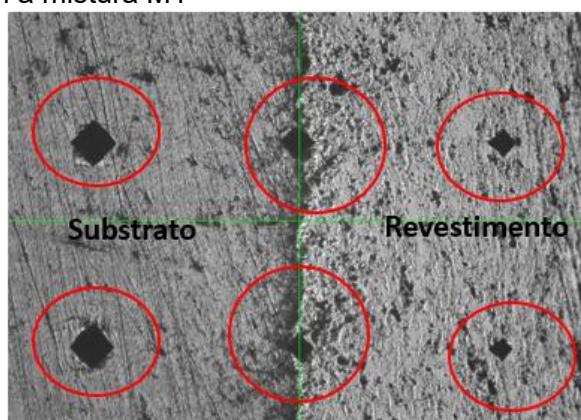
Figura 66 – Mapa das identações realizadas sobre a superfície do revestimento M2



Fonte: O Autor (2024).

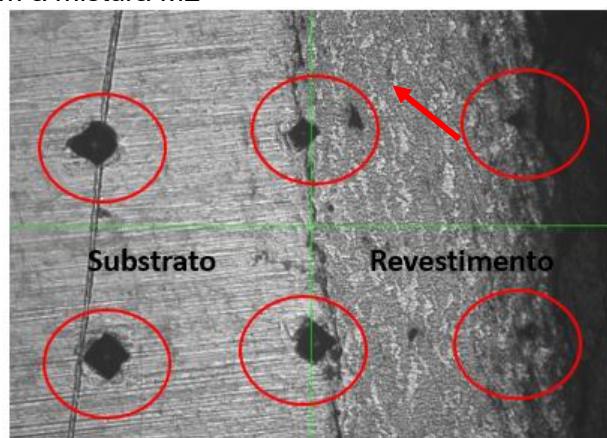
As figuras 67 e 68 mostram as microscopias de seis identações realizadas nas superfícies das amostras revestidas com as misturas M1 e M2.

Figura 67 - Imagem da microscopia de seis identações realizadas na superfície da amostra revestida com a mistura M1



Fonte: O Autor (2024).

Figura 68 – Imagem da microscopia de seis indentações realizadas na superfície da amostra revestida com a mistura M2

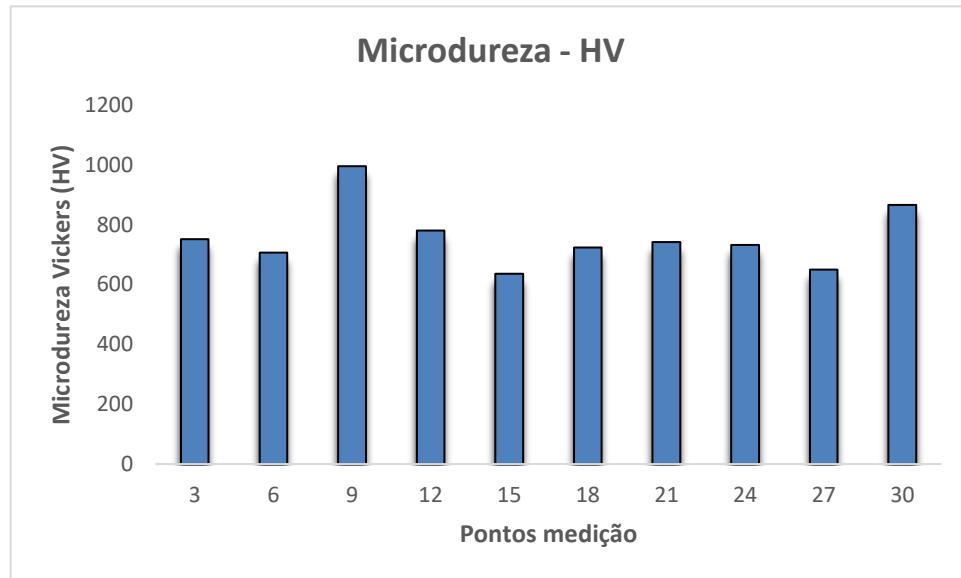


Fonte: O Autor (2024).

O critério adotado foi a média das medições realizadas nas amostras e seus respectivos desvios padrão, pois os revestimentos não são homogêneos e apresentam microestruturas lamelares que são alinhadas paralelamente ao substrato, além da existência de possíveis vazios e poros. Dessa forma, obtemos valores diferentes. Esperava-se valores da microdureza para os revestimentos da mistura M1 e M2, valores próximos 1000 HV_{0,5}, conforme literatura consultada (Rijeza, 2011).

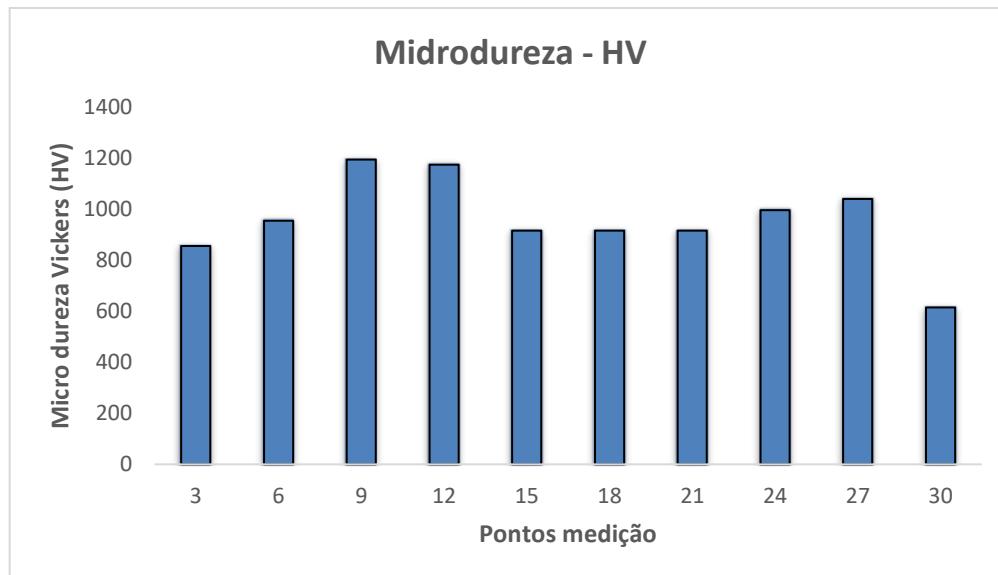
As figuras 69 e 70 mostram os valores obtidos em dez indentações realizadas nas superfícies das amostras revestidas por aspersão térmica para obtenção das microdurezas Vickers (um dos objetivos específicos deste trabalho)

Figura 69 – Resultados das medidas de microturezas de uma superfície revestida por aspersão térmica de uma mistura de pós M1



Fonte: O Autor (2024).

Figura 70 – Resultados das medidas de microturezas de uma superfície revestida por aspersão térmica de uma mistura de pós M2.

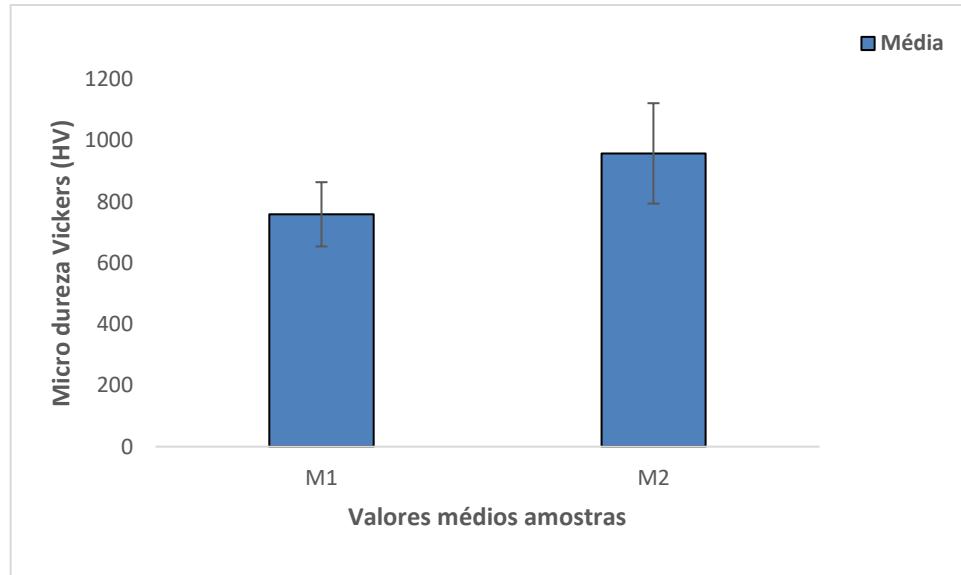


Fonte: O Autor (2024).

A figura 71 mostra os valores médios e seus desvios padrão das medições obtidas no ensaio de microtureza Vickers utilizando uma carga de 0,5kgf. Vale salientar que as identações foram realizadas numa área da secção transversal dos

revestimentos das amostras, sabendo-se que os revestimentos são anisotrópicos, ou seja, possuem propriedades mecânicas diferentes dependendo da região onde foi realizado as medições do ensaio.

Figura 71 – Valores médios das medições das microdureza nas amostras revestidas com pós das misturas M1 e M2.



Fonte: O Autor (2024).

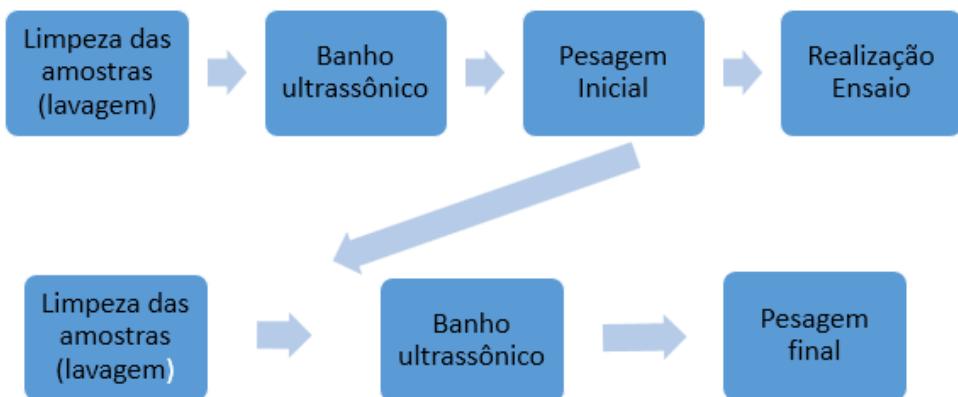
Os valores das microdurezas Vickers obtidos ficaram em média, próximos a 800 HV_{0,5} no revestimento M1 e próximo de 1000 HV_{0,5} no revestimento M2. Portanto, considerando apenas a dureza superficial, o revestimento da mistura M2 seria o mais recomendado. Ele oferece a melhor relação custo-benefício, pois apesar do menor custo de aplicação, atinge a dureza superficial que proporciona maior resistência ao desgaste abrasivo. Os valores acima foram também encontrados nos estudos de Singh e Prakashi (2012) para esse mesmo material de revestimento (960 HV_{0,3}), na proporção de 25% de carbeto de cromo-NiCr e carbeto de tungstênio. Comeli (2006) obteve valores médios 950 HV_{0,5} em revestimentos de carbeto.

5.3 DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados no laboratorio de tribologia instalado no INTM/UFPE. O equipamento utilizado foi um abrasômetro por roda de borracha seguindo os parametros estabelecido pela norma ASTM G65-16R21 (desgaste abrasivo por roda de borracha), procedimento C.

A figura 72 mostra as etapas da realização do ensaio de desgaste abrasivo da limpeza das amostras até a pesagem final.

Figura 72 - Etapas para realização do ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65-16R21.



Fonte: O Autor (2025).

Os resultados obtidos dos ensaios estão detalhados na figura 73, onde mostram os parâmetros do ensaio e os resultados após a realização dos ensaios. Nos cálculos das perdas em volume, as densidades das misturas M1 e M2, considerou-se as orientações de Callister e Rethwisch (2018), neste caso a média harmônica ponderada, considerando as frações em massa de cada mistura e as densidades de cada pó utilizado.

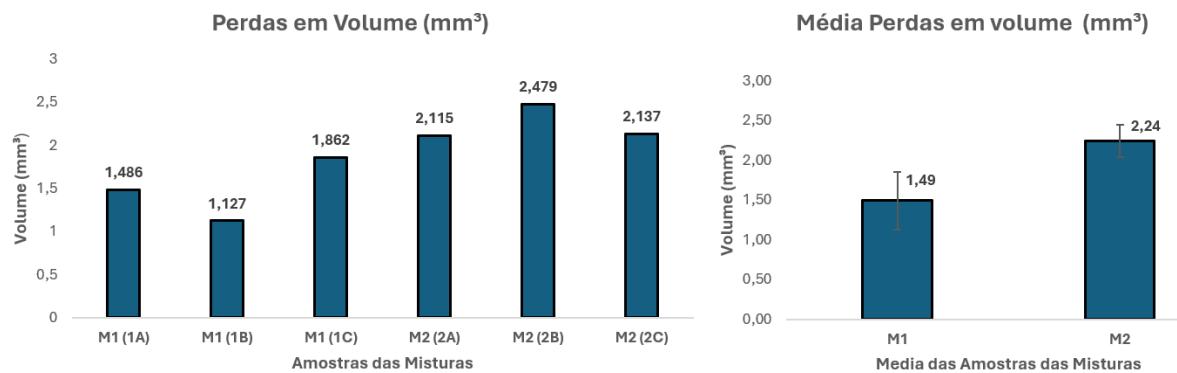
Figura 73 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste abrasivo.

Parâmetros ensaio desgaste abrasivo ASTM G65/13 (massa das amostras em g)												
Vazao da Areia 322,15 g/min (Norma 300 a 400 g/min)	Amostra 1B (g)		Amostra 1A (g)		Amostra 1C (g)		Amostra 2A (g)		Amostra 2B (g)		Amostra 2C (g)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
	144,251	144,232	145,149	145,135	142,736	142,713	142,544	142,524	142,629	142,604	145,870	145,848
	144,249	144,232	145,144	145,137	142,735	142,712	142,544	142,524	142,628	142,605	145,871	145,849
	144,25	144,231	145,145	145,131	142,735	142,714	142,543	142,524	142,628	142,605	145,869	145,851
	144,249	144,234	145,146	145,131	142,734	142,714	142,543	142,523	142,628	142,606	145,870	145,851
	144,248	144,231	145,146	145,130	142,736	142,714	142,543	142,523	142,627	142,604	145,869	145,850
Media	144,249	144,232	145,146	145,133	142,735	142,713	142,543	142,524	142,628	142,605	145,870	145,850
Desv. Pad	0,0011402	0,0012247	0,001871	0,003033	0,000837	0,000894	0,0005477	0,000548	0,000707	0,000837	0,000837	0,001304
Perda (g)	0,017		0,013		0,022		0,020		0,023		0,020	
Diam. Roda (mm)	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
	228,60	228,55	228,55	228,52	228,52	228,5	228,5	228,48	228,48	228,45	228,45	228,43
Perda Vol.(mm³)	1,486		1,127		1,862		2,115		2,479		2,137	
Densidade M1 (g/cm³)	11,71						Densidade M2 (g/cm³)		9,36			

Fonte: O Autor (2025).

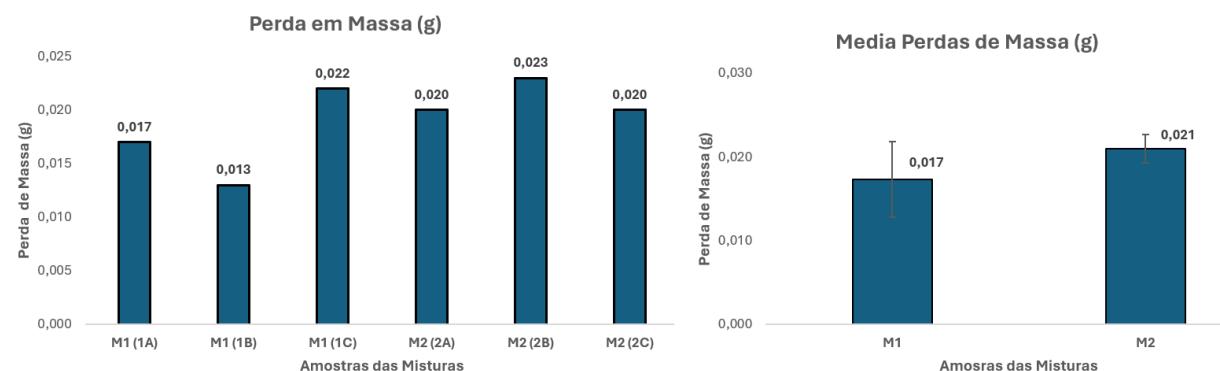
As figuras 74 e 75 apresentam os resultados obtidos da perda de volume e de massa das amostras após realização do ensaio de desgaste abrasivo.

Figura 74 – Perda de volume das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após realização do ensaio (mm^3).



Fonte: O Autor (2025).

Figura 75 – Perda de massa das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após realização do ensaio (g).



Fonte: O Autor (2025).

Castro (2014) no seu estudo sobre revestimento de carbeto de tungstênio-WC, depositado por aspersão térmica como alternativa ao cromo duro eletrodepositado aplicados em equipamentos hidráulicos, apresentou resultados de perda de volume, realizado no abrasômetro por roda de borracha, valores compatíveis com os obtidos neste trabalho.

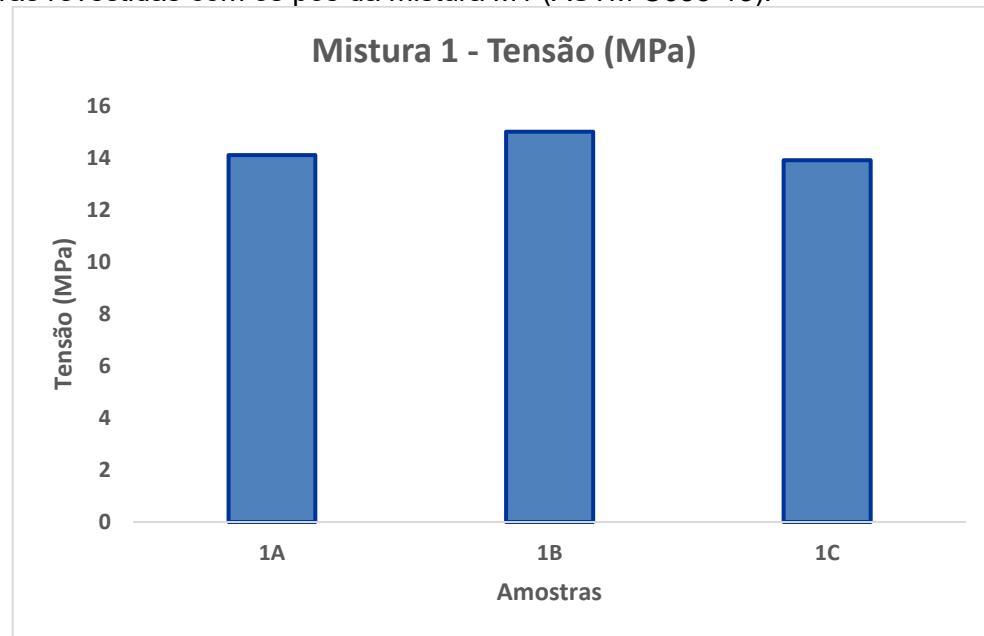
5.4 ADERÊNCIAS DOS REVESTIMENTOS

Nos seus ensaios de aderência, Maranho (2006) utilizou um adesivo ultrabond 100. Já Paredes (1998), nos seus ensaios de revestimentos de alumínio por aspersão térmica, utilizou inicialmente um adesivo CA-9 do fabricante 3M

porem não obteve êxito, pois o mesmo se rompeu com uma carga muito baixa. Posteriormente, utilizou um outro tipo de adesivo, Araldit AW 106 com um endurecedor HV 953U, obtendo êxito. Nesse estudo, utilizamos inicialmente um adesivo epoxi araldite professional 24 horas do fabricante Texbond, cuja eficiência foi relatada por Andreia (2019). Refizemos posteriormente o mesmo ensaio de adesividade por tração, dessa vez utilizando o adesivo Scotch Weld DP-460 do fabricante 3M. (figura 48), pois não conseguimos obter no mercado os adesivos comprovadamente eficientes utilizados por Maranho (2006), o qual já teve resultados satisfatórios em trabalhos anteriores e servindo como uma alternativa ao adesivo Scotch Weld DP-460 do fabricante 3M, Figura 48, utilizado por Paredes (1998).

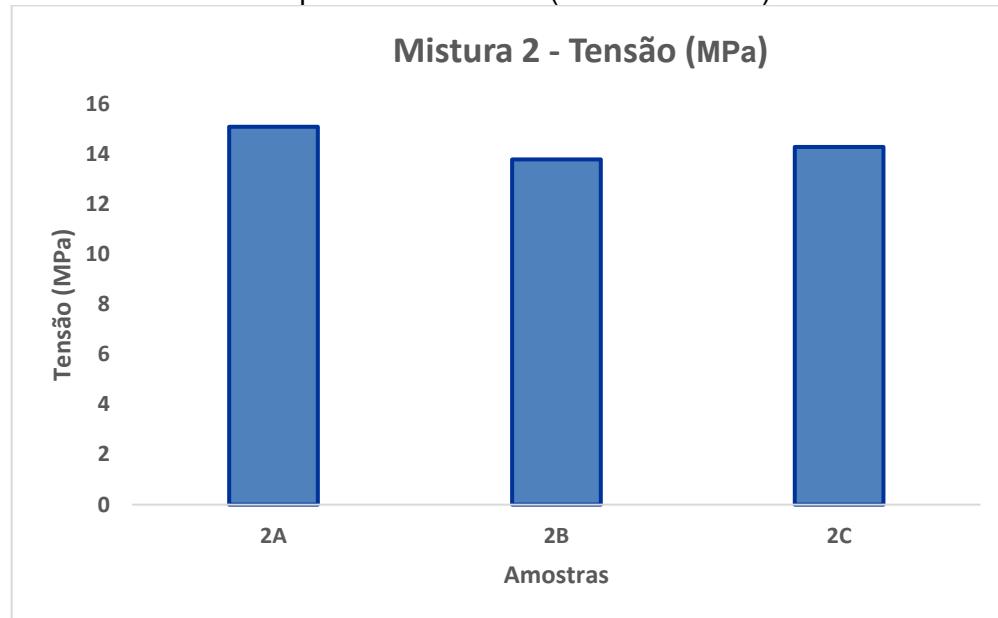
Os resultados obtidos no ensaio de adesividade por tração, inicialmente não foram muitos satisfatórios, devido a baixa eficiência do adesivo, apesar de algumas amostras, o adesivo ter rompido com tensões superiores a 13 MPa. Os valores das tensões de ruptura obtidas no ensaio de tração, após a utilização do segundo tipo de adesivo (fabricante 3M), estão mostrados nas figura 76, 77 e 78:

Figura 76 – Resultados das tensões de ruptura do ensaio de adesividade por tração das amostras revestidas com os pós da mistura M1 (ASTM C633-13).



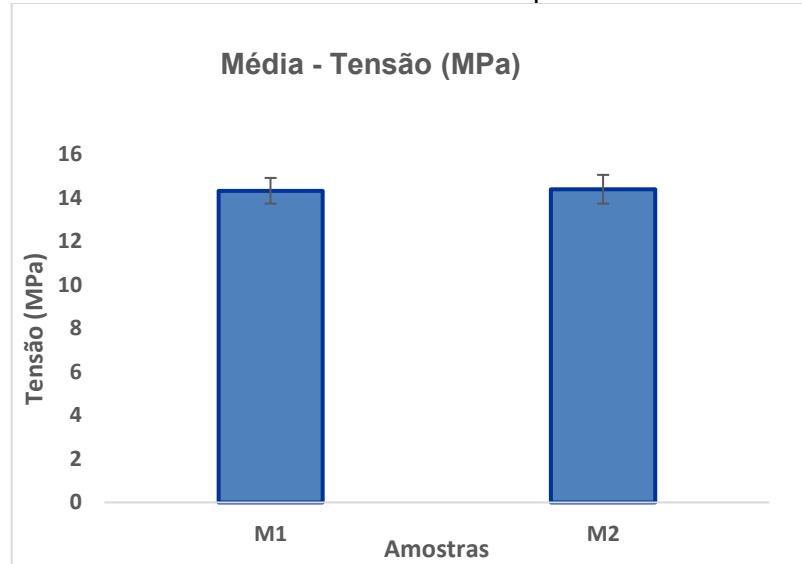
Fonte: O Autor (2025).

Figura 77 – Resultados das tensões de ruptura do ensaio de adesividade por tração das amostras revestidas com os pós da mistura M2 (ASTM C633-13).



Fonte: O Autor (2025).

Figura 78 – Resultados das médias das tensões de rupturas do ensaio de adesividade.



Fonte: O Autor (2025).

A figura 79 mostra o que prevaleceu foi a falha no adesivo, caracterizando um ensaio relativamente pobre. Refizemos os ensaios utilizando um adesivo com maior resistência ao esforço de traçao, obtendo resultados próximos ao ensaio anterior, desta vez utilizando um adesivo de eficácia comprovada.

Figura 79 - Imagem das amostras revestidas com os pós das misturas M1 e M2 após ensaio de adesividade por tração mostrando que a falha foi no adesivo.



Fonte: O Autor (2025).

A ASTM C633-13 não informa quais os valores mínimos de aderência que os revestimentos aspergidos termicamente devam ter para serem considerados aprovados, simplesmente ela retrata que a aderência do revestimento deve ser o suficiente para que o desempenho do mesmo atenda ao tempo de vida útil esperado para aquele componente que o recebeu.

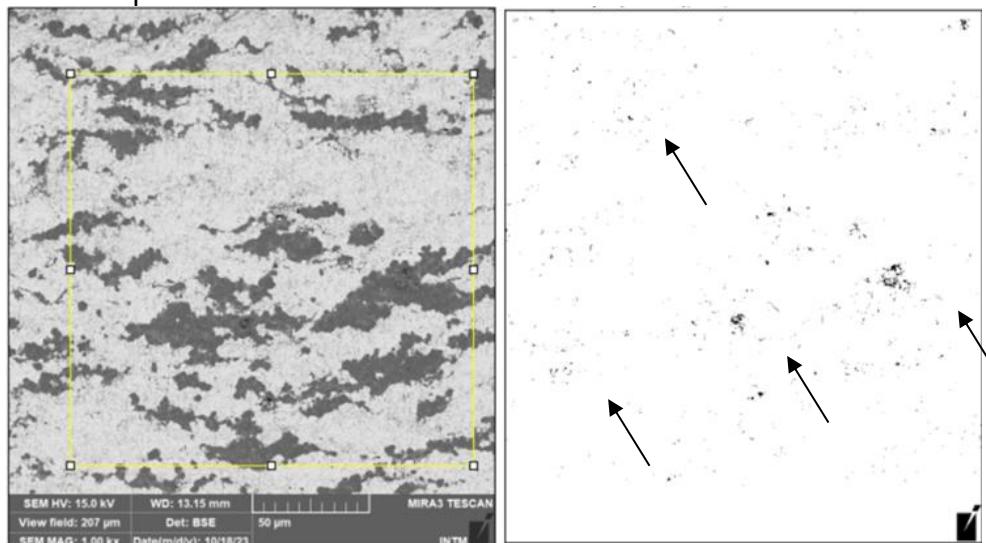
A norma Petrobras N-2568 informa que os revestimentos para serem considerados satisfatórios, devam apresentar um valor médio de tensão de ruptura de 13,8 MPa e que nenhum valor obtidos sejam inferior a 10,3 MPa.

5.5 POROSIDADE NOS REVESTIMENTOS

A determinação da porosidade dos revestimentos foi realizada através das imagem de microscopias eletrônica de varredura (MEV) com resolução de 200X e 1000X. Foi utilizado o software de código aberto Image J para auxiliar esta análise. Para identificação dos poros foram convertidas as imagens na escala de cinza (8 bits), transformando-a em preto e branco, sem tonalidades intermediarias de cinza. Seguindo as orientações da norma ASTM E-2109-21, selecionou-se aleatoriamente nas microscopias de cada revestimento, uma região/área e seguindo o passo a passo as orientações do método, no final foi obtidos os valores percentuais de cada

fase/coloração analisada. A figura 80 mostra o resultado da análise da porosidade a partir da microscopia do revestimento M1. O valor da porosidade de 0,52% foi obtido comparando a soma das áreas dos pontos pretos (representadas pelas setas) em relação a tonalidade branca, Portanto abaixo dos 1%.

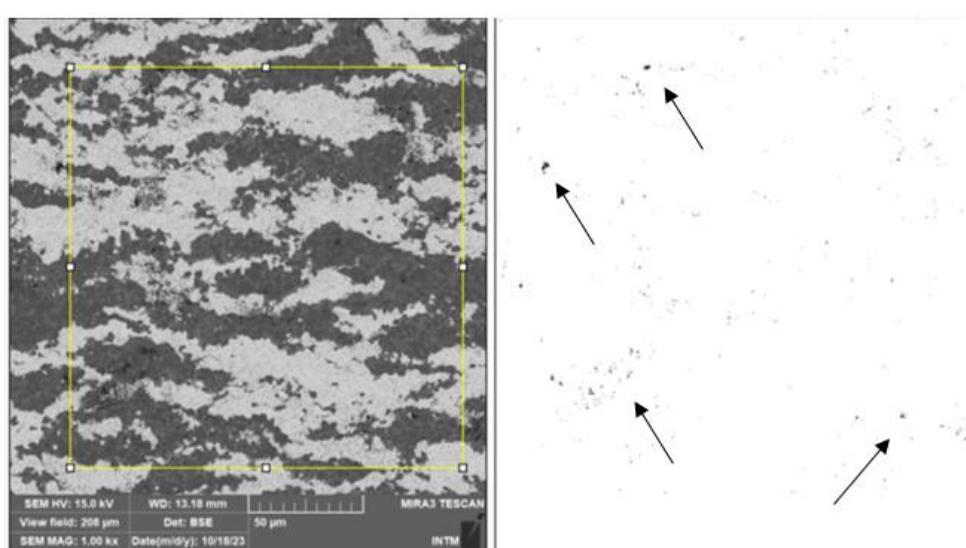
Figura 80 – Imagem da região utilizada para determinação da porosidade da superfície revestida com os pós da mistura M1.



Fonte: O Autor (2025).

A figura 81 mostra para o revestimento M2 um resultado de porosidade de 0,20%, também inferior a 1% (pontos de poros indicados pelas setas).

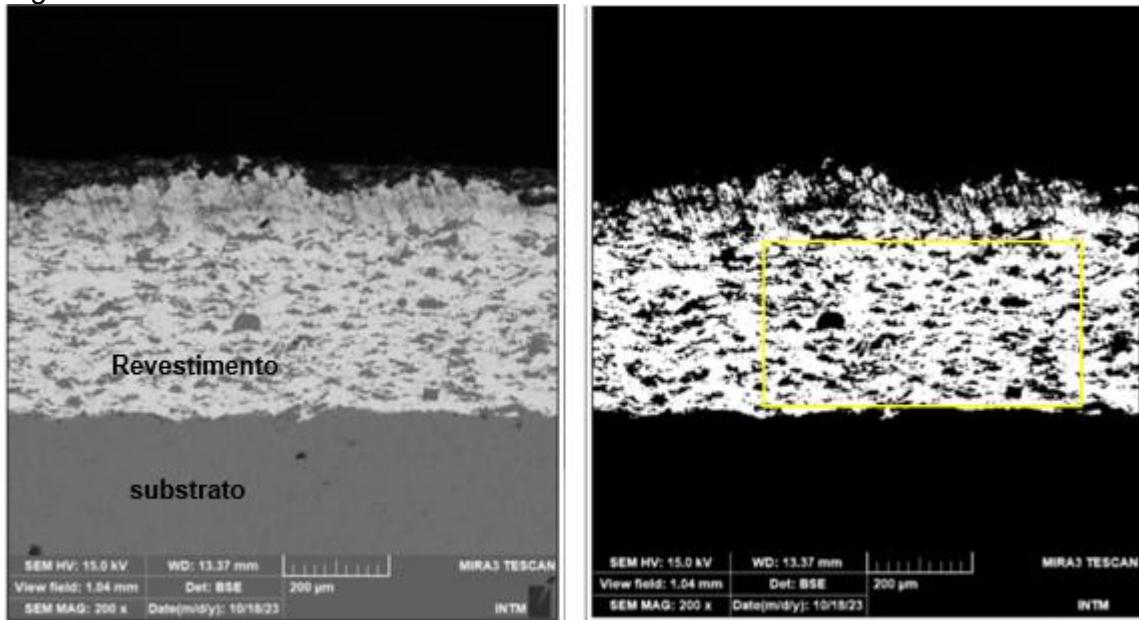
Figura 81 – Imagem da região utilizada para determinação da porosidade da superfície revestida com os pós da mistura M2.



Fonte: O Autor (2025).

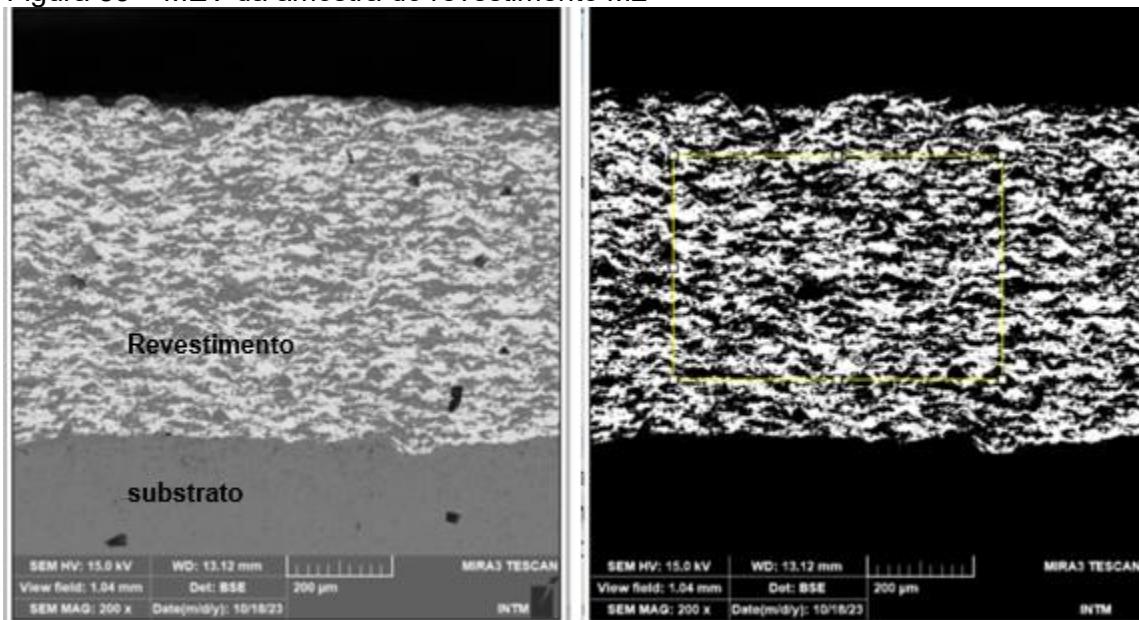
Os resultados da determinação da porosidade obtidos nos revestimentos M1 e M2 foram satisfatórios, abaixo de 1%. Vale salientar que as microscopias (MEV) foram realizadas na secção transversal das amostras revestidas, como mostra as figuras 82 e 83.

Figura 82 – MEV da amostra do revestimento M1



Fonte: O Autor (2025).

Figura 83 – MEV da amostra do revestimento M2



Fonte: O Autor (2025).

5.6 ENSAIO DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA

O ensaio de corrosão eletroquímica foi realizado no laboratório de corrosão, localizado no LITPEG da UFPE. O objetivo foi levantar uma estimativa da taxa de corrosão dos revestimentos M1 e M2 a partir dos dados da curva de polarização potenciodinâmica.

A taxa de corrosão foi determinada conforme metodologia descrita em ASTM G59-97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements e G102-23 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.

O processo teve início com a determinação da densidade de corrente a partir da divisão da corrente de corrosão (I_{cor}) obtida através da extrapolação das regiões lineares das curvas de Tafel catódica e anódica próximas ao potencial de corrosão (E_{corr}) Popov (2015). A intersecção da extrapolação dessas regiões com E_{corr} fornece uma estimativa precisa de I_{cor} que dividida pela área da superfície da amostra exposta ao ensaio (cm^2), neste caso de 0,785 cm^2 , se obtém a densidade de corrente i_{cor} , como mostra a equação 6.

$$i_{cor} = \frac{I_{cor}}{A} \quad (6)$$

Obtida a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), esse valor foi então convertido em taxas de perda de massa (MR) ou penetração (CR) utilizando a Lei de Faraday, considerando o peso equivalente (EW) e a densidade do material revestido com as misturas M1 e M2 (ρ_1, ρ_2), equações 7 e 8.

$$MR = K_2 i_{cor} EW \quad (7)$$

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} EW \quad (8)$$

Onde:

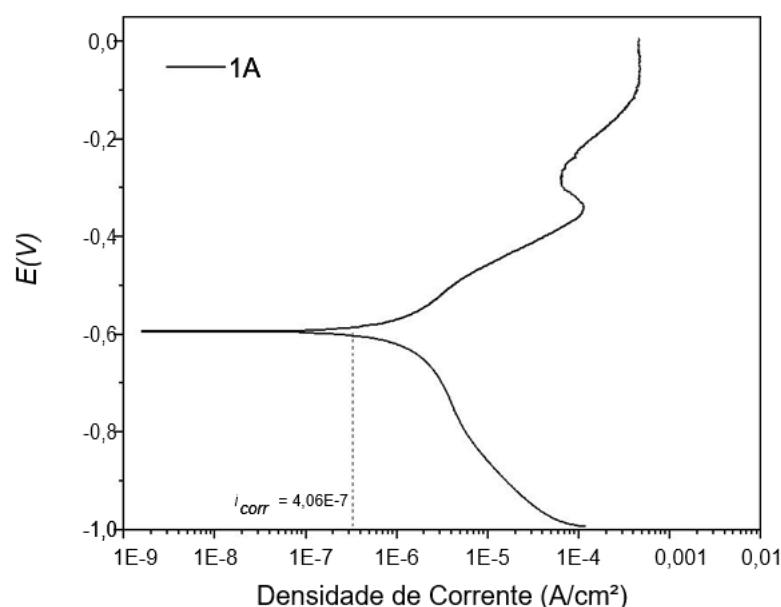
- CR = mm/ano;
- i_{corr} = $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;

- $K_1 = 3.27 \times 10^{-3}$, mm g/ μ A cm ano; (constante obtida da ASTM G102, tabela 2)
- $\rho_1 = 11,71$ g/cm³ para a mistura M1;
- $K_2 = 8.954 \times 10^{-3}$, g cm²/ μ A m² d; (constante obtida da ASTM G102, tabela 2)
- $\rho_2 = 9,36$ g/cm³ para a mistura M2;
- $EW = (\text{peso atômico do elemento} - W) / \text{valência do elemento.}$

Essa abordagem pressupõe que o material apresenta corrosão ativa e uniforme e demanda considerações precisas de valência na determinação de EW para minimizar possíveis erros.

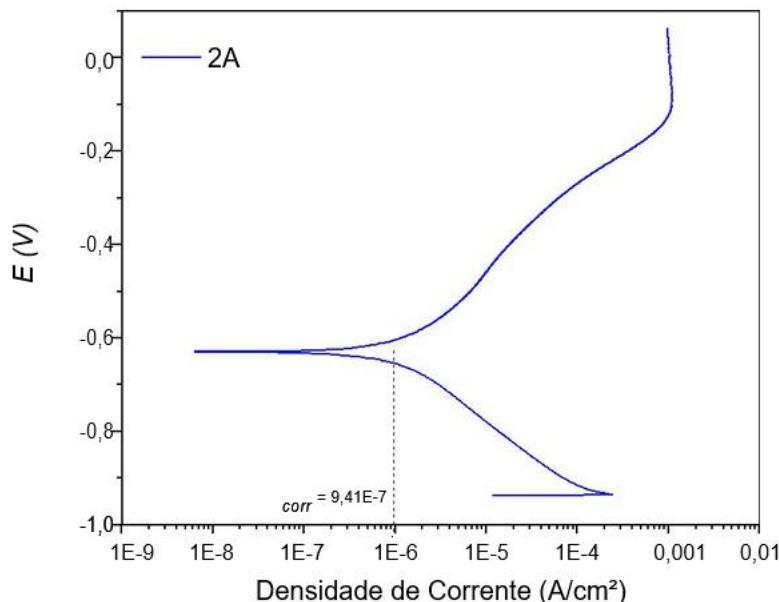
As Figuras 84 e 85 apresentam as curvas de polarização potenciodinâmica resultantes dos dados brutos obtidos nos ensaios. A Tabela 11 apresenta os valores de taxa de corrosão em representadas por taxa de penetração (CR) e perda de massa (MR) calculados a partir da densidade de corrente de corrosão, i_{cor} , como descrito anteriormente.

Figura 84 – Curva de polarização potenciodinâmica da amostra revestida com os pós da mistura M1 para determinação de i_{cor} por extração do trecho linear.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 85 – Curva de polarização potenciodinâmica da amostra revestida com os pós da mistura M2 para determinação de I_{corr} por extração do trecho linear.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 11 – Valores obtidos das taxas corrosão a partir do I_{corr} e E_{corr} convertidas em Taxa de Penetração (CR) e Perda de Massa (MR) no ensaio de corrosão eletroquímica – Tafel.

Amostras	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Valência para as misturas M1 e M2	Taxa de Penetração CR (mm/ano)	Perda de Massa MR ($\text{g}/\text{m}^2\text{d}$)
MET250055 – 1A	0,406	6+	0,01020	0,43653
MET250056 – 2A	0,941		0,03780	1,61834
MET250055 – 1A	0,406	4+	0,01530	0,65479
MET250056 – 2A	0,941		0,05674	2,42749

Fonte: O Autor (2025).

A tabela 12 mostra taxas de corrosão por penetração estendida, obtidas de forma qualitativa, dos principais aços resistentes à corrosão utilizados em locais de extrema agressividade (Teplo-Polis, 2022).

Tabela 12 - Taxa de corrosão dos principais materiais metálicos aplicados ambientes agressivos

Material	Aplicação	Taxa corrosão por penetração (mm/ano)
AISI 304	Água quente, Indústria de alimentos	0,01 - 0,10
AISI 316L	Água do mar, ácidos	0,10 - 0,50

Material	Aplicação	Taxa corrosão por penetração (mm/ano)
Super Duplex 2507	Cloreto, Água do mar, ácidos	0,01 – 0,05
Ferro Fundido Cinzento	Água mineral, fluviais	0,10 – 0,30
	Fonte: Adaptado (Teplo-Polis,2022)	

Vale salientar que o ensaio de corrosão eletroquímica é do tipo quantitativo e os dados informados na tabela 12 foram obtidos de forma qualitativa (método de perda de massa por Névoa Salina) não podendo servir como base de comparação. A tabela 13 mostra os valores obtidos por ensaio de corrosão eletroquímica por diversas metodologias, dessa forma, esses valores servem como comparação em relação aos resultados obtidos nesse estudo, pois utilizou-se de métodos similares ((Roberge, 2000) e (Baboian,1995)).

Tabela 13 - Comparativo das taxas de corrosão por penetração obtidas pela técnica eletroquímica em diversos aços

Material	Eletrólio / Condições	Taxa de Corrosão por penetração (mm/ano)	Técnica Eletroquímica Principal	Fonte da Informação (Referência)
Aço SAE 1020	Solução 3.5% NaCl (água salina)	0.8 - 1.2	Curva de Polarização Tafel	Fontana, M. G. - <i>Corrosion Engineering</i>
Aço SAE 1020	Solução 1M HCl (ácido clorídrico)	25 - 40	Curva de Polarização Tafel	Ahmad, Z. - <i>Principles of Corrosion Engineering</i>
Aço AISI 304	Solução 3.5% NaCl (passivo)	< 0.002	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	ASTM G59 - Standard Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization
Aço AISI 304	Solução 1M H ₂ SO ₄ (ácido sulfúrico)	~0.1 (em região ativa)	Curvas Potentiodinâmicas	Revie, R. W.; Uhlig, H. H. - <i>Corrosion and Corrosion Control</i>

Material	Eletrólito / Condições	Taxa de Corrosão por penetração (mm/ano)	Técnica Eletroquímica Principal	Fonte da Informação (Referência)
Aço API 5L	Solução salina			Papavinasam, S.
X65 (petróleo e gás)	acidificada (pH ~3) com CO ₂	2 - 8	Polarização Linear	- <i>Corrosion Control in the Oil and Gas Industry</i>
Aço Galvanizado (com zinco)	Solução 3.5% NaCl	0.02- 0.05 (proteção catódica do Zn)	Monitoramento do Potencial de Corrosão	Roberge, P. R. - <i>Handbook of Corrosion Engineering</i>

Fonte: Autor (2025)

5.7 APLICAÇÃO DA ASPERSÃO TÉRMICA COMO RECOMPOSIÇÃO DIMENSIONAL E MELHORIA DE ÁREAS LOCALIZADAS.

Neste trabalho utilizou-se a técnica da aspersão térmica como uma alternativa de recomposição dimensional e melhoria localizada de componentes de bombas fornecidos por duas empresas parceiras, sendo um dos objetivos específicos deste trabalho. Os objetivos são de reduzir custos, aumentar o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*) concomitantemente melhorando as propriedades mecânicas das regiões afetadas pelos desgastes, sendo esse o principal motivo da troca desses componentes.

O custo da aplicação dos revestimentos também foi considerado como um dos fatores determinantes na seleção do processo para revestimento. As empresas que fornecem essa tecnologia, utilizam uma fórmula de cálculo para estimar o custo total da aplicação do revestimento ou recomposição dimensional, tomando como base a espessura da camada e do comprimento a ser revestido. Uma das formas de calcular os custo de um serviço de aspersão térmica é apresentada na equação 9 utilizada por Paredes (1997), a fim de chegar de forma mais assertiva a todos os custos envolvidos na aplicação dos revestimentos dos componentes envolvidos.

$$\text{Custo Total} = \text{CL} + \text{CPS} + \text{CAT}, \quad (9)$$

Onde:

- CL = Custo da limpeza do componente (limpeza química e mecânica);
- CPS = Custo de preparação da superfície (obtenção da rugosidade e texturização requerida);
- CAT = Custos ligados diretamente aos materiais aplicados e características físicas dos componentes- forma, peso etc.).

A base de todos os custos está no tipo de material a ser aspergido/aplicado no componente, fator de peso e espessura da camada a ser revestida.

A figura 86 mostra uma tabela que fornecedores de serviços aspersão térmica utilizam para atender as demandas dos serviços de aspersão térmica, em componentes de máquinas e equipamentos.

Figura 86 - imagem de uma tabela para cálculo dos custos de aplicação de revestimentos por aspersão térmica.

PLANILHA DE METALIZAÇÃO (PREÇO / dm ²)						
PROCESSO / LIGA	Ø Diâmetro	Comprimento L	Camada (mm)	Área (dm ²)	Preço(R\$) / dm ² (setembro 2025)	Preço final (R\$)
ARC SPRAY / LIGA Ni - Cr - Mn	0	0	0,5	0,00	300,00	0,00
ARC SPRAY / LIGA Ni - Cr	0	0	0,5	0,00	282,00	0,00
ARC SPRAY / INOX AISI 420	0	0	0,5	0,00	243,00	0,00
ARC SPRAY / INOX AISI 316L	0	0	0,5	0,00	293,00	0,00
ARC SPRAY / SAE - 1045	0	0	0,5	0,00	215,00	0,00
ARC SPRAY / LIGA Ni (100%)	0	0	0,5	0,00	348,00	0,00
FLAME SPRAY / LIGA Ni - Cr - B - Si	0	0	0,1	0,00	736,00	0,00
HVOF / CARBETO TUNGSTÉNIO	76	300	0,5	7,16	736,00	5269,17
FLAME SPRAY / LIGA OXICERÁMICA	0	0	0,1	0,00	480,00	0,00
CROMODURO ELETROLÍTICO	0	0	0,1	0,00	173,00	0,00
ARC SPRAY / LIGA BRONZE	0	0	0,5	0,00	283,00	0,00
ARC SPRAY / ALUMÍNIO / ZINCO	0	0	0,1	0,00	142,00	0,00
ARC SPRAY / STELITE #6	0	0	0,1	0,00	353,00	0,00
FLAME SPRAY / ALTO CROMO	0	0	0,5	0,00	264,00	0,00
ARC SPRAY / MONEL	0	0	0,5	0,00	354,00	0,00
FATOR PESO:	leve (1,00)	media (1,75)	pesada (2,50)	1	FATOR CAMADA:	1

Observações Gerais : A área mínima a ser cobrada não poderá ser menor que 1,0 dm², pois os custos para este tipo de serviço não se justificariam.
O fator peso será proporcional ao tamanho / peso das peças : (leve - 0 à 5kg ; média - 5 á 50kg ; pesada - mais de 50kg);
Com relação ao fator de camada será proporcional a profundidade do desgaste na região a ser aspergida.

Fonte: Adaptado (TST,2025)

Optou-se por utilizar nos revestimentos dos componentes de bombas fornecidos por empresas parceiras duas misturas da seguinte forma:

- Mistura M1: composta por 75% de metal duro (WC-Co) e 25% de carbeto de cromo e NiCr ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$).

- Mistura M2: com proporções iguais (50%) de metal duro (WC-Co) e carbeto de cromo-NiCr ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$).

Tomando como exemplo os dois êmbolos fornecidos por uma das empresas parceiras o custo total da aplicação por êmbolo seria de R\$ 5.269,17. Como mostra em destaque na figura 84. Nesse estudo todos os custos foram absorvidos pelas empresas parceiras, inclusive a que nos apoiou nas aplicações dos revestimentos dos corpos de provas e componentes de bombas fornecidos pelas empresas parceiras (TST). O preço de um êmbolo novo é de R\$ 30.000,00, dado esse, informado pela empresa parceira.

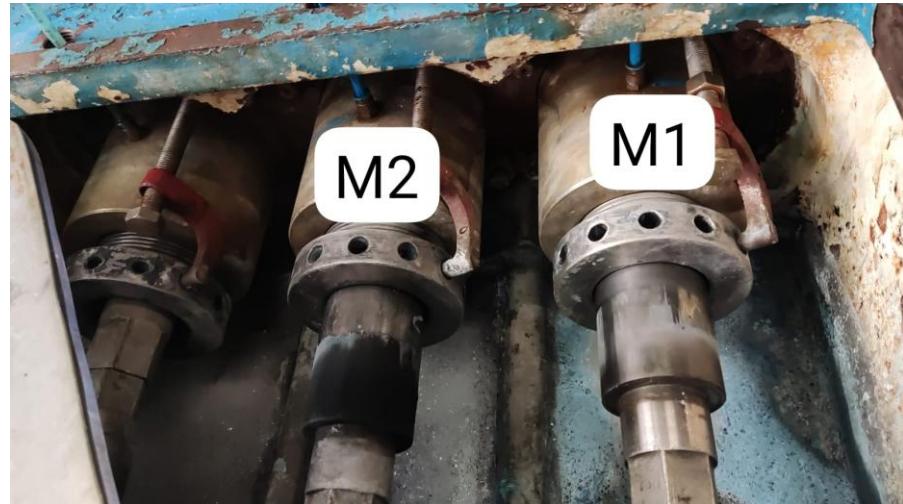
Os resultados obtidos nos revestimentos dos dois êmbolos da bomba alternativa, não foi favorável, em termos de durabilidade, as figuras 87 e 88 mostram os êmbolos sendo instalados na bomba e retirados após 30 dias de operação, onde apresentou uma coloração escura e riscos caracterizando como possível ataque químico e desgaste.

Figura 87 – Imagem dos dois êmbolos revestidos com as misturas M1 e M2 sendo instalados na bomba para acompanhamento da performance



Fonte: O Autor (2024).

Figura 88 – Imagem dos dois êmbolos após 30 dias de operação, bomba parada devido ao vazamento.



Fonte: O Autor (2024).

A figura 89 indica que o vazamento se iniciou no êmbolo revestido com a mistura M2. No entanto, a falha prematura não representa necessariamente uma ineficiência do revestimento em si, pois existem fatores operacionais que podem ter contribuído para o resultado. O acompanhamento da instalação final não foi possível, pois o serviço foi agendado para ocorrer fora do horário administrativo. Essa limitação impediu a verificação in loco tanto do estado das gaxetas quanto das condições de montagem, tornando a determinação da causa raiz do vazamento inconclusiva.

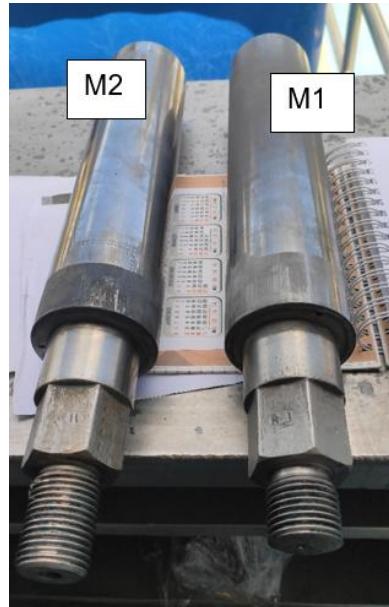
Figura 89 – Imagem do êmbolo revestido com a mistura M2 em operação mostrando um vazando produto.



Fonte: O Autor (2024).

A figura 90, mostra os dois êmbolos removidos após a falha.

Figura 90 – Imagem dos êmbolos removidos da bomba após 30 dias de operação contínua.



Fonte: O Autor (2024).

A placa de vedação (espelho) e o corpo espiral (voluta) da bomba centrífuga revestidos com as misturas M1 e M2, como mostra a figura 91 fornecidos pela segunda empresa parceira, continuam em operação há mais de 12 meses, superando o tempo do material original fornecido pelo fabricante do equipamento. Só poderemos mostrar o estado da região revestida (parâmetro utilizado para medir o desempenho - vida útil), após remoção da bomba, que até o momento não tem essa previsão, pois o estado de operação dessa bomba é monitorado em função do rendimento da sua vazão e pressão e em termos de desempenho mecânico, ela é monitorada pelos planos de manutenção preventiva e preditiva (análise de vibração).

Figura 91 – Placa de vedação (espelho) revestida com a mistura M1 e o corpo espiral (voluta) revestido com a mistura M2.



Fonte: O Autor (2024).

6 CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Pode-se considerar que este trabalho foi de grande relevância, pois as empresas que trabalham com esse tipo de serviço (revestimentos por aspersão térmica) quase não têm dados técnicos do desempenho dos seus revestimentos, desta maneira esse trabalho servirá também como uma fonte de pesquisa para justificar o uso dessa tecnologia. Salientamos que a maioria dos revestimentos ainda são realizados de forma manual devido a sua utilização em peças/componentes de geometria complexa e o alto custo da automação, impactando no retorno do capital empregado.

Quanto à microdureza, os valores obtidos para os revestimentos das misturas M1 e M2 foram próximas as obtidas por pesquisadores anteriores, conforme foi mencionado nesse trabalho. No tocante a esse requisito, recomenda-se a utilização de ambos os revestimentos em regiões de peças que necessitem de elevada dureza superficial, em torno de $1000HV_{0,5}$.

As espessuras de camada obtidas pelos processos utilizados mostraram-se compatíveis com a aplicação, sendo adequadas para promover melhorias localizadas em propriedades mecânicas como dureza, resistência ao desgaste rugosidade e recomposição dimensional.

A aderência dos revestimentos foi compatível com a norma Petrobras, pois valores obtidos da adesividade apresentaram tensões de ruptura entre 10,3 a 13,8 MPa, atendendo assim, aos critérios estabelecidos pela norma Petrobrás N-2568.

Os resultados das taxas de corrosão por penetração e perda de massa do ensaio de corrosão eletroquímica foram bastante satisfatórios. Pois os valores ficaram próximos se comparados os dados da taxa de corrosão em diversos aços como mostra a tabela 13. Dessa forma os revestimentos aplicados melhoraram de forma localizada a resistência ao desgaste abrasivo e a corrosão, sendo um dos objetivos desse trabalho.

Nas aplicações em componentes de bombas (um dos objetivos específicos deste trabalho), apesar dos resultados positivos em dureza e resistência à corrosão, não se recomenda a aplicação destes revestimentos em êmbolos de bombas alternativas que operam com o ***slurry químico***. Porém não se pode descartar um estudo mais aprofundado dos fatores que contribuíram para

ineficiência do revestimento nessa aplicação, porém nas aplicações em espelhos e volutas de bombas os resultados foram e estão sendo favoráveis.

Em suma, a utilização de um revestimento, seja como recomposição dimensional ou correção de especificação de um projeto, está relacionado aos custos da aplicação e a estimativa de vida útil dos componentes que os receberem.

O objetivo deste trabalho não foi desaconselhar a aquisição de peça originais dos fabricantes. Em vez disso, focar em apresentar melhorias que poderiam ser implementadas em áreas específicas de componentes de equipamentos, visando minimizar falhas decorrentes de limitações de projeto ou adaptar os equipamentos a novas condições operacionais.

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, E. Desgaste abrasivo. In: CONGRESSO ANUAL ABM, 58., 2003, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABM, jun. 2003. 61 p.

AMADA, S. Tribology of Thermal Sprayed Coatings. **Japanese Journal of Tribology**, v. 40, n. 8, 1995, p. 701-707.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117-19**. Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3359-09**. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. West Conshohocken, PA, USA, 2009)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-18-16**. Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials, West Conshohocken, PA, USA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-384-16**. Standard test method for microindentation hardness of materials, West Conshohocken, PA, USA, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-161**. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, West Conshohocken, PA, USA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40-96**. Standard terminology relating to wear and erosion, West Conshohocken, PA, USA, 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G77-91**. Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test. West Conshohocken, PA, USA, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard C633-13**. Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coating, drawing is copyright. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard E-2109**. Test method for determining area percentage porosity in thermal sprayed coat. West Conshohocken, PA, USA: International Handbook, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G5-14**. Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements, West Conshohocken, PA, USA, 2014.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal spraying**. Practice, theory and applications. Miami, FL, USA, 1985.

ASM Handbook, Volume 5A: **Thermal Spray Technology**, ASM International, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLDAGEM. **Curso de Metalização**. São Paulo/SP, <https://abs-soldagem.org.br/>, 1994.

BABOIAN, Robert. **Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation**. United States: ASTM, 1995

BALL, A. The mechanisms of wear and the performance of engineering materials. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 86, n. 1, p.1-13, jan. 1986.

BECKER, A. **Resistência à cavitação e erosão por jato de lama de revestimentos binários de WC/Cr₃C₂ depositados por chama de alta velocidade**. 2021. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

BERNDT, C. C.; LEIGH, S. H. A test for coating adhesion on flat substrates: a technical note. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 3, n. 2, p. 184-190, jun. 1994.

BERNECKI, T. et al. **Handbook of thermal technology**. Editora ASM INTL : ASM, 1994.

BOZZA, G. M.; FERRARI, L. N. **Análise da resistência à erosão de revestimentos WC10Co4Cr aspergidos pelos processos HVOF e HVAF**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

BRETT, M. A. C.; BRETT, A. M. **Electrochemistry: principles, methods and applications**. Grã-Bretanha: Brookcraft, 1993.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction***. 10th Edition, John Wiley & Sons, 2018

CAMARGO, F. **Preaquecimento do substrato**. Ogramac Metalização, jun. 1999. Disponível em: ogramac@ogramac.com.br. Acesso em: 10 jan. 2025.

CARVALHO, P. R. **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

CASTRO, R. M. et al. Revestimento de WC depositado por aspersão térmica como alternativa ao cromo duro eletrodepositado aplicados em equipamentos hidráulicos. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, Madri, v. 19, p. 22-42, 2015.

CENTER FOR INNOVATIVE SINTERED PRODUCTS. **Facilities**. Disponível em: <http://www.cisp.psu.edu/facility.html>. Acesso em: 24 nov. 2016.

COMELI, F. W. **Estudo de revestimento aspergido por HVOF contra o desgaste em haste de válvulas de turbinas termoelétricas.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

COUTO, Luís Claudio de Oliveira. Aspersão térmica na construção metálica-ciência e arte. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA,), 2006, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, Setembro 2006.

DALLAIRE, S.; ARSENAULT, B.; DESANTIS, A. Investigation of selected plasma-sprayed coatings for bonding glass to metal in hermetic seal applications. **Surface and Coating Technology**, v. 53, p. 129-135, 1992.

FAUCHAIS, P. et al. Thermal Spray Coatings: A Review. **Journal of Thermal Spray Technology**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 719-756, maio 2011.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9662-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-011-9662-9>. Acesso em 05/09/2025.

FREIRE, F. **Avaliação de revestimentos aplicados por aspersão térmica para proteção contra o desgaste de ponteiras de Risers.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2002.

GATES, J. Two body and three body abrasion: a critical discussion. **Wear**, v. 214, n. 1, p. 139-146, 1998.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GENTIL, V.; CARVALHO, L. J. **Revestimentos:** limpeza e preparo de superfícies. In: GENTIL, V.; Corrosão. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. Cap. 21. p. 228-234.

GIBBONS, D. W.; PILLARY, G. J. Electrochem. **Soc.**, v. 142, p. 3597, 1995.

GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. **Tratamento de superfície e pintura.** Rio de Janeiro: IBS/SBCA, 2003.

GNECCO, C.; MATSUMOTO, S. Padrões visuais fotográficos de limpeza de superfícies análise crítica e discussão técnica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PINTURA ANTICORROSIVA, 2017, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: 2017.

GONÇALVES, E. **Ensaio de Corrosão:** teste de imersão. CCDM, 07 jul. 2020. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/2020/07/07/ensaios-de-corrosao-testes-de-imersao/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

GREVING, D. J.; SHADLEY, J. R.; RYBICKI, E. F. Effects of coating thickness and residual stresses on bond strength of C633-79 Thermal spray coating test specimens. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 7., 1994, Boston, Massachusetts. **Anais** [...]. Boston, Massachusetts: AWS, jun. 1994. p. 639-645.

HOWES, C. P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. **Welding Journal**, v. 73, p. 188-191. abr. 1994.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology-friction and wear of engineering materials**. 7. ed. London: Edward Arnold, 1992.

INFOSOLDA. **Processos de soldagem**. Apostila. 1997. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/231-aspersao-termica.html>. Acesso em: 10 jan. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11124-2.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Specifications for metallic blast-cleaning abrasives – Part 2: Chilled-iron grit. 2018, <https://www.iso.org/standard/66706.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11124-3.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Specifications for metallic blast-cleaning abrasives – Part 3: High-carbon cast-steel shot and grit. 2018, <https://www.iso.org/standard/66706.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11125-3.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Test methods for metallic blast-cleaning abrasives – Part 3: Determination of hardness.<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66699/4caacc1b927c4c9e95e491d3c9df7c4a/ISO-11125-3-2018.pdf>, 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11126-3.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Specifications for non-metallic blast-cleaning abrasives – Part 3: Copper refinery slag.<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66709/f1bfc85bf6ed46968bb4100813349199/ISO-11126-3-2018.pdf>, 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11126-4.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Specifications for non-metallic blast-cleaning abrasives – Part 4: Coal furnace slag.
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66710/fc531587cf824a69b26b3e98bebb89b/ISO-11126-4-2018.pdf>, 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4287.

Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: profile method - Terms, definitions and surface texture parameters.

ISO, 1997.<https://guide.digitalsurf.com/en/guide-iso-4287-parameters.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8501-2.

Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 2: Preparation grades of previously coated steel substrates after localized removal of previous coatings. 1997, <https://www.iso.org/standard/15712.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8502 (all parts). Preparation of steel substrates before application of paints and related

products – Tests for the assessment of surface cleanliness. 2020,
<https://www.iso.org/standard/73862.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8503 (all parts). Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates,2012,
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/51979/7c2758d1fd8745eaa9302a2fee7e1510/ISO-8503-1-2012.pdf>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8504-2. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface preparation methods – Part 2: Abrasive blast-cleaning.2019,
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72939/4bf089cd83034d98b400134c04d9a1bb/ISO-8504-2-2019.pdf>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8504-3. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface preparation methods – Part 3: Hand and power tool cleaning.2018,
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66696/085d60651c9c43a8a156dd7ae60285da/ISO-8504-3-2018.pdf>

JIANG, S. et al. Effect of pulse frequency on the one-step preparation of superhydrophobic surface by pulse electrodeposition. **Applied Surface Science**, v. 458, p. 603-611, 2018.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197892100010X>

KAUR, M., SINGH, H.; PRAKASH, S. High-Temperature Behavior of a High-Velocity Oxy-Fuel Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating. **Metallurgical and Materials Transactions**, v. 43, p. 2979-2993, 2012. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1118-4>. Acesso em: 10 jan. 2025.

KNAPP, J. K.; TAYLOR, T. A. Waterjet roughened surface analysis and bond strength. **Surface and Coating Technology**, Indianapolis, 1996.
<https://www.bohrium.com/paper-details/waterjet-roughened-surface-analysis-and-bond-strength/812677182865276931-2083>

KREPSKI, R. P. **Thermal spray coating applications in the chemical process industries**. Houston, EUA: Nace International, 1993.

LEIGH, S. H. et al. Tensile adhesion testing of thermal spray coatings on flat substrates. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 1994, Boston, Massachusetts. **Anais** [...]. Boston, Massachusetts: AWS, 1994. p. 655-662.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. **Aspersão térmica**: fundamentos e aplicações. 2. ed. rev. e amp. Sao Paulo/SP: ArtLiber, 2007.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. Ensaio de adesão em revestimentos Metal-Cerâmicos obtidos por aspersão térmica a plasma. **Revista Ciência & Tecnologia**, p.51-61, 1999.
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME715/AT%20PGMEC/Artigos%20para%20Semin%C3%A1rio/Ensaio%20ades%C3%A3o%20PS.pdf>

MAGNANI, M. **Estudo da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos metálico-cerâmicos aplicados na liga AA7050 mediante aspersão térmica incombustível de alta velocidade (HVOF)**. 2008. 241 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, São Paulo, 2008.

MANFRINATO, M. D. *et al.* Metallic coating adhesion obtained through spraying testing. In: INTERNATIONAL FEDERATION FOR HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING, 18., 2010, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: [s.l.], 2010.

MARANHO, O.; SINATORA, A. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, P. V. **Aspersão térmica**. Infosolda, 2003. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/asperso-termica.pdf.

MÁRQUEZ, M. V. C. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono ASTM 572 Gr50 exposto a óleo cru, água do mar e misturas de óleo/água do mar em condições estáticas e dinâmicas**. 2016. 41 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MCPHERSON, R. The relationships between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma-sprayed coatings. **Thin solids films**, v. 83, n. 3, p. 297-310, 1981.

MELLALI, M. *et al.* Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 6, n. 2, p. 217-226, jun. 1997.

METERNS-LECOMTE, C.; MUCK, D.; GARCIA, J. Characterization of a new aerospace thermal barrier coating. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 7., 1994, Boston-Massachusetts. **Anais** [...]. Boston, Massachusetts: AWS, jun. 1994. p. 61-65.

MICHEL, B. *et al.* Printing meets lithography: soft approaches to high-resolution patterning. **IBM Journal of Research and Development**, agosto 2001.

NASCIMENTO, J. C. S. **Estudo de corrosão em aço API 5L X60 em contato com água de processo e água de injeção de poços terrestres de exploração de petróleo**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE MR0175/ISO 15156 (latest revision)**. Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Houston, TX: NACE, 2005.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE RP0775-2005: Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations.** Houston: NACE International, 2005. 16 p.

NUNES, L. P. **Fundamentos de resistência a corrosão, Brasil.** Rio de Janeiro: Interciencia, 2007.

PALOVÁ, K.; KELEMENOVÁ, T.; KELEMEN, M. Measuring procedures for evaluating the surface roughness of machined parts. **Applied Sciences**, v. 13, p. 9385, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13169385>. Acesso em: 10 jan. 2025.

PAREDES, R. S. C. **Estudos de revestimentos de alumínio depositado por três processos de aspersão térmica para proteção do aço contra corrosão marinha.** 1998. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 1998.

PARKER, D. W.; KUTNER, E. L. HVOF spray technology poised for growth. **Advanced Materials and Processes**, v. 139, n. 4, p. 68-74, 1991. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353897001310>).

PARREIRA, J. G. Texturização superficial sem mascaramento com finalidades tribológicas. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PAWLOWSKI, L. **The Science and engineering of thermal spray coating.** 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

PEARSON, B. R.; BROOK, P. A. The synthesis of electrode polarization curves. **Corrosion Science**, v. 32, n. 4, p. 387-398, 1991.

PETROBRAS. **Norma N-2568:** seleção e aplicação (aspersão térmica) do alumínio, zinco e suas ligas como revestimento anticorrosivo. Rio de Janeiro: Petrobras, 2019.

PETROBRAS. **Norma N-2843:** revestimento interno de tubos. Brasília: Petróleo Brasileiro, 2020.

POPOV, B. N. **Corrosion engineering principles and solved problems.** New York: Elsevier, 2015.

REPORT SULZER METCO #106. **evaluation methods and equipment for flame sprayed coatings.** Research laboratory, item 12, 1973. 15p.

Princeton Applied Research. (org.). Application Note AC-1: **basics of electrochemical impedance spectroscopy.** Disponível em: <file:///C:/Users/Cliente/Downloads/EISBasics-Princeton.pdf> . Acesso em: 18 abr. 2023.

RIJEZA METALÚRGICA. **Parâmetros de Aspersão Térmica – HVOF para WC-CoCr.** Porto Alegre: Rijeza, 2011.

ROBERGE, Pierre R. **Handbook of corrosion engineering.** New York: McGraw-Hill, 2000. 1139 p.

SANTOS, A. O. **Estudo da resistência à corrosão em aço e revestimentos visando aplicação em hastes de bombeio de petróleo.** Aracaju, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracajú, 2008.

STEFFENS, H. D.; WIELAGE, B.; DROZAK, J. Interface phenomena and bonding mechanism of thermally-sprayed metal and ceramic composites. **Surface and Coating Technology**, v. 45, n. 1-3, p. 299-308, mai. 1991.

THERMAL SPRAY TECHNOLOGY. Empresa localizada no município de Jaboatão dos Guararapes/PE. www.tstne.net

THORPE, M. L. **Thermal spray advanced materials & processes.** Metal Park, Vol. 157 Edi. 4, 1993.

THORPE, M. L. Thermal spraying makes the grade as a repair process. **Welding Journal**, Volume 71, p. 45-48, USA, nov. 1992.

TICIANELLI, E. A. **Eletroquímica:** princípios e aplicações. 2. ed. 2. reimpr. São Paulo: USP, 2013.

TREVISAN, R. E.; FALS, H. C.; LIMA, C. R. C. Evaluacion critica de los ensayos de adesion en revestimientos obtenidos por aspersión termica. **Información Tecnológica**, Chile, v. 11, n. 4, p. 103-112, 2000.

TREZONA, R. I.; HUTCHINGS, I. M. Three-body abrasive wear testing of soft materials. **Wear**, Volume 233-235, p. 209-221, 1999.

VELASCO, D. C. et al. Caracterização da preparação superficial de substratos metálicos por meio de um jateamento rotativo. **Brazilian Journal of Development**, v.8, n.4, p.24260-24271, apr.,2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/46134/pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

VIEIRA, M. R. S. **Estudo dos processos de corrosão e biocorrosão causados por fluidos da indústria de petróleo.** 2013. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VREIJLING, M. P. W. **Electrochemical characterization of metallic thermally sprayed coatings.** Netherlands: TNO Institute of Industrial Technology, 1998.

WEISS, H. Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment. **Surface and Coatings Technology**, v. 71, n. 2, p. 201-207, mar. 1995.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/025789729401022B?via%3Dihub>.

WIGREN, J. Grit-blasting as surface preparation before plasma spraying. In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, Orlando, Florida, USA, pp. 99/104. 1988.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: USP 129, 2003.

WOLYNEC, S.; ESCALANTE, E. Determination of 'true' polarization curves for corrosion rate measurements of steel in NaCl stagnant solutions. **Corrosion**, v. 36, n. 7, p. 327-334, jul. 1980.

ZAHARADDEEN, A. B. et al. Microstructure and wear behavior of WC-reinforced AlCoCrFeNiSi high entropy alloy coatings prepared by high-velocity arc spraying. **Surface and Coatings Technology**, v. 494, part. 2, 2024.

ANEXO A – CERTIFICADO DO MATERIAL CARBETO DE TUNGSTÊNIO WC+ 12CO (PÓ)



CERTIFICATE OF ANALYSIS

V2.0

Luoyang Golden Egret Geotools Co., Ltd
A branch of XTC
No.68, North Binhe Road,
National High&New Tech Industry Zone,
Luoyang, Henan, China 471000
Phone:+86-379-61101102

Invoice No.
GL-040892

Sales order
SO19120189

Delivery item/data
SN19120510/2019-12-30

Customer Number
GLC002377

Material
XTC@Spray GP12 -45/+15um
WC-12Co Agglomerated & Sintered
Batch HS190982-1 /Quantity 400.00 KG
A sample from the batch was analyzed with the following

Characteristic	Unit	Value	Low Limit	Upper Limit
Chemicals				
Co	%	12.10	11.00	13.00
C Total	%	5.40	5.20	5.70
Cf	%	0.05		0.10
O	%	0.023		0.100
Fe	%	0.0050		0.5000
W	Bal	Balance		
Particle Size Distribution				
+53µm*	%	0.0		1
+45/-53µm	%	1.1		3.0
+38/-45µm	%	9.2	5.0	15.0
+20/-38µm	%	75.6		
+15/-20µm	%	10.0	5	15.0
-15µm	%	4.1		5.0
Physical Performance				
Apparent Density	g/cm ³	4.70	4.40	5.20
Flow Rate	s/50g	13.5		25.0

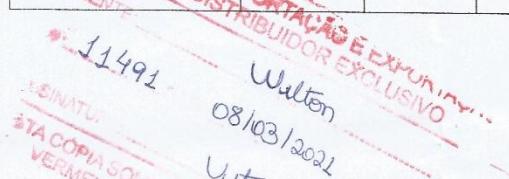
Screen Analysis Made to ASTMB214

~~1991~~ 1992-1993 Model Year GM GM1000

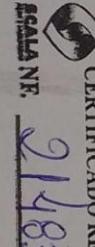
Flow Rate s/50g 13.5 25.
Screen Analysis Made to ASTM B214
**Laser Diffraction Made to ASTM C1070
Wilton 08/03/2021

Flow Rate s/50g
Sieve Analysis Made to ASTM B214
Wilton 08/03/2021 1,0 kg
**Laser Diffraction Made to ASTM C1070
Victoria Sousa
VERIFICAÇÃO DA CORRISÃO DA SÍNTESI
VERIFICAÇÃO DA CORRISÃO DA SÍNTESI
REPRODUÇÃO PROIBIDA

ANEXO B – CERTIFICADO DE CARBETO DE CROMO CR₃C₂ + 25NiCr (PÓ)

洛阳金鹭硬质合金工具有限公司 LUOYANG GOLDEN EGRET GEOTOOLS CO.,LTD. NO.68 BINHE NORTH RD., NEW&HIGH TECH INDUSTRY DEVELOPMENT ZONE, LUOYANG, HENAN, CHINA Tel:+86-379-61101001 Fax:0379-61101766																						
质量证明书 CERTIFICATE OF ANALYSIS																						
产品名称(Product)	Thermal Spray Powder																					
牌号(Grade)	批次编号(Lot No.)																					
GP25NC	HS190200H																					
一、物理性能 Physical performance																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">项目(Item)</td> <td style="width: 50%;">松装密度 Apparent Density(g/cm³)</td> </tr> <tr> <td>标准(Standards)</td> <td>>2.30</td> </tr> <tr> <td>实测值(Measured Data)</td> <td>2.74</td> </tr> </table>		项目(Item)	松装密度 Apparent Density(g/cm ³)	标准(Standards)	>2.30	实测值(Measured Data)	2.74															
项目(Item)	松装密度 Apparent Density(g/cm ³)																					
标准(Standards)	>2.30																					
实测值(Measured Data)	2.74																					
二、化学成份 Chemical composition(%)																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>项目(Item)</th> <th>镍(Ni)</th> <th>铬(Cr)</th> <th>总碳(Ct)</th> <th>游离碳(Cf)</th> <th>氧(O)</th> <th>铁(Fe)</th> </tr> <tr> <td>标准 (Standards)</td> <td>19.00-21.00</td> <td>69.20-70.90</td> <td>8.50-11.00</td> <td><0.30</td> <td><0.100</td> <td><0.5000</td> </tr> <tr> <td>实测值(Measured Data)</td> <td>19.72</td> <td>70.73</td> <td>9.42</td> <td>0.09</td> <td>0.032</td> <td>0.1200</td> </tr> </table>		项目(Item)	镍(Ni)	铬(Cr)	总碳(Ct)	游离碳(Cf)	氧(O)	铁(Fe)	标准 (Standards)	19.00-21.00	69.20-70.90	8.50-11.00	<0.30	<0.100	<0.5000	实测值(Measured Data)	19.72	70.73	9.42	0.09	0.032	0.1200
项目(Item)	镍(Ni)	铬(Cr)	总碳(Ct)	游离碳(Cf)	氧(O)	铁(Fe)																
标准 (Standards)	19.00-21.00	69.20-70.90	8.50-11.00	<0.30	<0.100	<0.5000																
实测值(Measured Data)	19.72	70.73	9.42	0.09	0.032	0.1200																
三、筛分 Particle Size Distribution(Wt.%)																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>项目(Item)</th> <th>+53μm</th> <th>-53+45μm</th> <th>-45+38μm</th> <th>-38+20μm</th> <th>-20+15μm</th> <th>-15μm</th> </tr> <tr> <td>标准(Standards)</td> <td><1.0</td> <td><5.0</td> <td>5.0-30.0</td> <td>--</td> <td><15.0</td> <td><10.0</td> </tr> <tr> <td>实测值(Measured Data)</td> <td>0.3</td> <td>2.3</td> <td>9.1</td> <td>73.4</td> <td>9.2</td> <td>5.7</td> </tr> </table>		项目(Item)	+53μm	-53+45μm	-45+38μm	-38+20μm	-20+15μm	-15μm	标准(Standards)	<1.0	<5.0	5.0-30.0	--	<15.0	<10.0	实测值(Measured Data)	0.3	2.3	9.1	73.4	9.2	5.7
项目(Item)	+53μm	-53+45μm	-45+38μm	-38+20μm	-20+15μm	-15μm																
标准(Standards)	<1.0	<5.0	5.0-30.0	--	<15.0	<10.0																
实测值(Measured Data)	0.3	2.3	9.1	73.4	9.2	5.7																
 11491 Walton 08/03/2021 Utensil Seusa 2,0kg Esta cópia somente é válida quando assinada e vermelha e com a assinatura original REPRODUÇÃO PERTINENTE 审核(Signature): 日期(Date): 2019/6/13 洛阳金鹭硬质合金工具有限公司质管部 QUALITY CONTROL DEPARTMENT OF GEOTOOLS																						

ANEXO C – CERTIFICADO DO MATERIAL SUBSTRATO AISI 1020 (BARRA CHATA E TARUGO)

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE										CERTIFICADO N.º:	GU0000026022 / 2015																															
										NOTA FISCAL N.º:	DATA:																															
										00182059	10/09/2015																															
W CIAFAL CIAFAL COM. IND. DE ART. DE FERRO E AÇO S/A. RUA WILSON SANTOS, 653 - CENTRO INDUSTRIAL - DIVINÓPOLIS CEP: 35.562-286 - TEL/FAX: (37) 2101-1400 CNPJ: 20.14687760003-67 - IE: 2230281370096																																										
CLIENTE:										REFERÊNCIA CLIENTE:																																
SCALA COM. IND. AÇOS TUBOS E LAM LT																																										
MATERIAL B. ICH. 1 X3.8 - 5.00M - 100561022M - S ✓										IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL PESO (TON) 2.295 OCEP/DI Sr. Jair C.																																
COMPOSIÇÃO QUÍMICA <table border="1"> <thead> <tr> <th>CORRIDA</th> <th>C%</th> <th>Si%</th> <th>P%</th> <th>S%</th> <th>C%</th> <th>Ni%</th> <th>Mo%</th> <th>Al%</th> <th>Nz%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>150910AC</td> <td>0.06</td> <td>0.25</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>max</td> <td>0.230</td> <td>1.400</td> <td>0.300</td> <td>0.040</td> <td>0.050</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										CORRIDA	C%	Si%	P%	S%	C%	Ni%	Mo%	Al%	Nz%	150910AC	0.06	0.25	0	0	0	0	0	0		max	0.230	1.400	0.300	0.040	0.050	0.000	0.000	0.000				
CORRIDA	C%	Si%	P%	S%	C%	Ni%	Mo%	Al%	Nz%																																	
150910AC	0.06	0.25	0	0	0	0	0	0																																		
max	0.230	1.400	0.300	0.040	0.050	0.000	0.000	0.000																																		
OBSERVAÇÕES Aço Comercial - 10001022M Aço Comercial - 100561022M										ASSINATURA  Paulo W. Ribeiro - 20/09/2015 <small>At.鳞板厂有限公司</small>																																
										DATA: 10/09/2015																																
 CERTIFICADO REF. <u>Scala NR.</u> <u>21483</u>																																										