

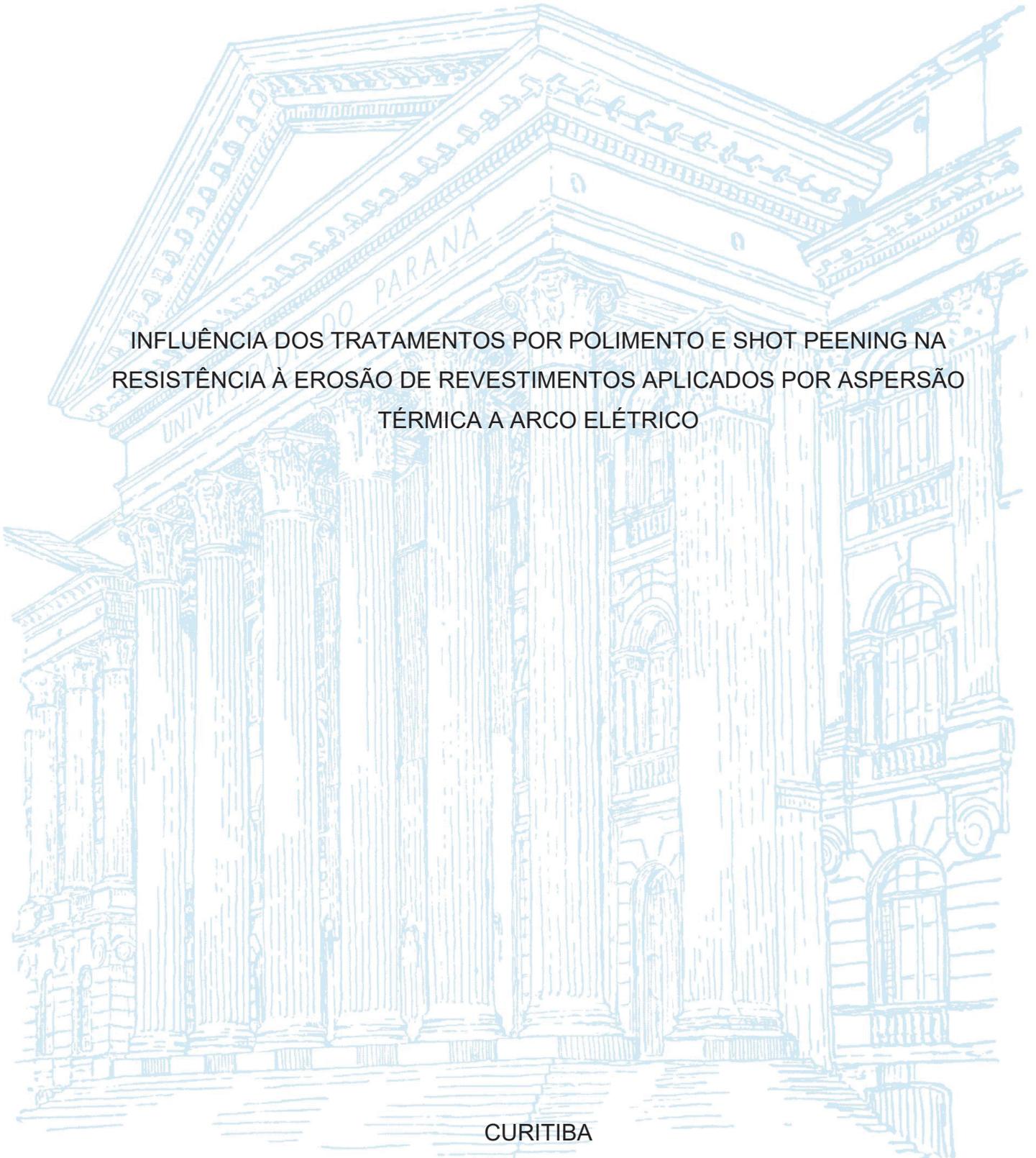
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ CHICOSKI

INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS POR POLIMENTO E SHOT PEENING NA
RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO

CURITIBA

2021



ANDRÉ CHICOSKI

INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS POR POLIMENTO E SHOT PEENING NA
RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia da Manufatura - PPGEM, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski

CURITIBA

2021

C533i

Chicoski, André

Influência dos tratamentos por polimento e *shot peening* na resistência à erosão de revestimentos aplicados por aspersão térmica a arco elétrico [recurso eletrônico] / André Chicoski - Curitiba, 2021.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski

1. Usinas hidrelétricas. 2. Aspersão térmica. 3. Revestimentos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Paredes, Ramón Sigifredo Cortés. III. Sucharski, Gustavo Bavaresco. IV. Título.

CDD 620.11223

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRÉ CHICOSKI** intitulada: **INFLUÊNCIA DOS PÓS-TRATAMENTOS POR POLIMENTO E SHOT PEENING NA RESISTÊNCIA À EROSÃO DE REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 09 de Dezembro de 2021.

Assinatura Eletrônica
21/12/2021 15:45:05.0
RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
24/01/2022 12:23:09.0
CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
21/12/2021 15:52:05.0
FERNANDO DIAS VIEIRA
Avaliador Externo (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS)

Assinatura Eletrônica
21/12/2021 16:09:40.0
MARCELO TORRES PIZA PAES
Avaliador Externo (CENPES/PETROBRAS)

Dedico este trabalho à minha mãe, Regina Souza, que sempre destacou a importância da educação para meu desenvolvimento e que tanto fez para que não me faltassem oportunidades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Regina e João (*in memoriam*), e aos meus irmãos, Fernando, Davi e Ivan, que foram sempre meus grandes exemplos.

À minha amada companheira, Paula, que está sempre ao meu lado e torna minha vida muito mais feliz. Sem esquecer a Frida e o Jeremias, os “filhos” de quatro patas que completam nossa família e que fornecem tantos momentos de alegria e descontração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ramón S. C. Paredes, um dos grandes responsáveis pelo meu interesse na pesquisa, por todo o apoio e ensinamento que vem desde os tempos da graduação.

Ao amigo, ex-colega de trabalho e coorientador Dr. Gustavo B. Sucharski, por todo o apoio ao longo das atividades do mestrado, sempre disposto a contribuir com ótimas ideias e sugestões, além de parceiro para boas risadas.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec, por disponibilizar todo material e equipamentos necessários para as atividades. Agradeço também aos muitos amigos que lá fiz ao longo de vários anos de trabalho, em especial à MSc. Eng. Irene B. A. F. Siqueira e ao MSc. Eng. Rodolpho Fernando Vaz, parceiros de trabalho de longa data e que muito contribuíram com meu conhecimento e crescimento profissional. Entre tantos outros, não posso deixar de citar os amigos Andre R. Capra, Carlo G. Filippin, Igor G. Zanella, Lucas V. Hoeffling e Juan F. Costa.

Ao amigo Prof. Dr. Anderson G. M. Pukasiewicz, que além de ter dado grande apoio durante os ensaios de erosão, foi sempre um grande exemplo de profissional e muito me ensinou ao longo de vários anos em que trabalhamos em conjunto.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Paraná – UFPR e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura (PPGEM) pela oportunidade deste importante passo no meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

Atualmente no Brasil, mais de 60% da energia elétrica consumida vem da geração hidrelétrica, cuja potência instalada ultrapassa 109 GW. Nas usinas hidrelétricas, independente do tipo de turbina hidráulica utilizada, os componentes que ficam em contato com o fluxo de água são frequentemente expostos a fenômenos de desgaste como cavitação e erosão por partículas sólidas. Tais fenômenos são capazes de gerar danos significativos aos componentes, causando elevados custos de manutenção e de perda de produtividade por máquina parada. Neste contexto, a utilização de revestimentos anti-desgaste é uma alternativa interessante para aumento da vida útil das peças, sendo que a tecnologia de aspersão térmica aparece como uma das principais e mais viáveis formas de aplicação destes, em função de sua versatilidade e capacidade de deposição de camadas protetoras com diferentes propriedades químicas e físicas, e com muito baixo impacto ao substrato. Considerando aplicações contra a erosão por partículas sólidas, é comum a utilização de revestimentos duros a base de aços martensíticos, ou carbonetos de cromo e/ou tungstênio. Neste trabalho foi avaliada a resposta ao ensaio de erosão por jato de lama de dois revestimentos, com diferentes níveis de dureza, aplicados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico. Além disso, foi analisada também a influência da realização dos tratamentos superficiais dos revestimentos, por lixamento, polimento e *shot peening*. Em adição aos ensaios de erosão, foram estudadas as morfologias das camadas depositadas, assim como os mecanismos de desgaste presentes e suas correlações com a dureza de cada material. Os resultados indicaram que os revestimentos respondem ao processo erosivo de forma semelhante ao esperado para o material bruto, com atuação de diferentes mecanismos de desgaste em função da dureza da camada depositada. Neste sentido, considerando os parâmetros de ensaio adotados, com ângulo de jato de 90° em relação à superfície revestida, as camadas com menor dureza apresentaram menores perdas de massa e volume. No caso da condição como aspergida, a liga de menor dureza apresentou perda de volume total 13% menor em relação àquela mais dura. Os tratamentos de lixamento e polimento geraram redução das taxas iniciais de desgaste, porém os ganhos não justificam o material perdido durante o próprio processo de tratamento. A aplicação de *shot peening* não gerou melhorias significativas, e, inclusive, afetou negativamente a resistência à erosão do revestimento de maior dureza.

Palavras-chave: Revestimento. Aspersão térmica. Erosão. *Shot peening*. Polimento.

ABSTRACT

Currently in Brazil, more than 60 % of electric energy comes from hydro generation, whose installed power exceeds 109 GW. In hydroelectric power plants, regardless of the type of hydraulic turbine used, those components in contact with the water flow are often exposed to wear phenomena such as cavitation and solid particle erosion. Such phenomena may cause significant damage to the components, causing high maintenance and downtime costs. In this context, the use of wear resistant coatings is an interesting alternative to increase the life time of components, and the thermal spray technology is one of the main and most viable ways of applying these coatings, due to its versatility and ability to create protective layers with different chemical and physical properties, with very low impact on the substrate. Considering the coatings resistant to solid particle erosion, it is usual the selection of hard alloys based on martensitic steels, or chromium and/or tungsten carbides. In this work, the response to the slurry jet erosion test of two coatings, with different hardness levels, applied by arc spray thermal spray process (ASP) was evaluated. The influence of surface treatments applied to the coatings, by sanding, polishing and shot peening was also analyzed. In addition to the erosion tests, the morphologies of the deposited layers were studied, as well as the wear mechanisms acting on the coatings and their correlations with the hardness of each material. The results indicated that the coatings response to the erosive process is similar to that expected for the raw material, with different wear mechanisms acting as a function of the hardness of the thermal sprayed layer. Considering the test parameters, with a jet angle of 90° to the coated surface, the layers with lower hardness presented smaller losses in mass and volume. For the "as-sprayed" condition, the alloy with the lowest hardness showed a 13% lower total volume loss compared to the harder one. The sanding and polishing treatments reduced the initial wear rates, but the gains do not justify the material lost during the finishing processes themselves. The shot peening process did not generate significant improvements to the coatings, and even negatively affected the erosion resistance of the hardest one.

Keywords: Coating. Thermal spray. Erosion. Shot peening. Polishing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DIVISÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA POR ORIGEM DE COMBUSTÍVEL.	16
FIGURA 2: MODELO ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DA ASPERSÃO TÉRMICA.	21
FIGURA 3: MICROESTRUTURA ESPERADA EM REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA.	21
FIGURA 4: PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA.	23
FIGURA 5: FAIXAS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA.	24
FIGURA 6: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO.	25
FIGURA 7: DESENHO ILUSTRATIVO DE UMA PISTOLA DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO.	25
FIGURA 8: FUNCIONAMENTO DE UMA PISTOLA HVOF.	28
FIGURA 9: ILUSTRAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE DESGASTE.	29
FIGURA 10: EROÇÃO DE MATERIAIS DÚCTEIS E FRÁGEIS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE IMPACTO.	30
FIGURA 11: FORMAS DE EROÇÃO EM MATERIAIS DÚCTEIS (A) E FRÁGEIS (B) E EM DIFERENTES ÂNGULOS DE IMPACTO.	31
FIGURA 12: ILUSTRAÇÃO DOS MECANISMOS DE EROÇÃO POR MICROSULCAMENTO E MICROCORTE.	31
FIGURA 13: RESISTÊNCIA À EROÇÃO POR PARTÍCULAS DURAS EM DIFERENTES MATERIAIS.	33
FIGURA 14: PROCESSO DE <i>SHOT PEENING</i> . EM (A) GERAÇÃO DA CAVIDADE SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DO IMPACTO DA ESFERA. EM (B) A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES LOGO ABAIXO DA SUPERFÍCIE.	35
FIGURA 15: GABINETE DE JATEAMENTO UTILIZADO TAMBÉM PARA <i>SHOT PEENING</i> . À ESQUERDA, VISÃO EXTERNA E, À DIREITA, VISÃO INTERNA DO EQUIPAMENTO.	35
FIGURA 16: DIFERENTES TAMANHOS DE ESFERAS DE AÇO UTILIZADAS PARA <i>SHOT PEENING</i>	36

FIGURA 17: REVESTIMENTO HVOF ANTES (ESQUERDA) E APÓS (DIREITA) <i>SHOT PEENING</i>	37
FIGURA 18: DISPOSITIVO UTILIZADO NO TESTE ALMEN.	39
FIGURA 19: APLICAÇÃO ROBOTIZADA DOS REVESTIMENTOS.	42
FIGURA 20: DISPOSITIVO PARA REGULAGEM DO ÂNGULO E DISTÂNCIA DE SHOT PEENING.	45
FIGURA 21: AMOSTRAS REVESTIDAS, ANTES (SUPERIOR) E APÓS (INFERIOR) A APLICAÇÃO DO CONTRASTE.....	46
FIGURA 22: TRAJETÓRIA DO JATO DE <i>SHOT PEENING</i> NA SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS REVESTIDAS.	47
FIGURA 23: EXEMPLO DE IMAGEM UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE ÓXIDOS E POROS DOS REVESTIMENTOS.....	49
FIGURA 24: POSIÇÕES DAS MEDIÇÕES DE MICRODUREZA NOS REVESTIMENTOS.	50
FIGURA 25: EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA - SLURRY JET TESTER.	51
FIGURA 26: AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. À ESQUERDA: LIGA 1. À DIREITA: LIGA 2.	55
FIGURA 27: MORFOLOGIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS DOIS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. AMPLIAÇÃO 100X.....	56
FIGURA 28: MORFOLOGIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. AMPLIAÇÃO 200 X. DETALHES PARA PRESENÇA DE TRINCAS NO REVESTIMENTO DA LIGA 2.....	57
FIGURA 29: ASPECTO SUPERFICIAL DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 (SUPERIOR) E LIGA 2 (INFERIOR).	63
FIGURA 30: DETALHE DA REGIÃO DESGASTADA NA AMOSTRA 01 CA, APÓS 4 MINUTOS DE ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA.	65
FIGURA 31: DETALHE DA REGIÃO DESGASTADA NA AMOSTRA 02 CA, APÓS 4 MINUTOS DE ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA.	66
FIGURA 32: AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 (PEÇAS SUPERIORES) E DA LIGA 2 (PEÇAS INFERIORES).	67

FIGURA 33: ASPECTO DAS SUPERFÍCIES ERODIDAS NAS AMOSTRAS 01 LX (ESQUERDA) E 01 PO (DIREITA).....	71
FIGURA 34: ASPECTO DAS SUPERFÍCIES ERODIDAS NAS AMOSTRAS 02 LX (ESQUERDA) E 02 PO (DIREITA).....	71
FIGURA 35: MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS APLICAÇÃO DE <i>SHOT PEENING</i> COM DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (VALOR DAS ESCALAS – 100 µm). AMPLIAÇÃO 200 X.....	74
FIGURA 36: MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS APLICAÇÃO DE <i>SHOT PEENING</i> COM DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (VALOR DAS ESCALAS – 100 µm). AMPLIAÇÃO 200 X.....	74
FIGURA 37: COMPARAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO DA LIGA 1 NO ESTADO COMO ASPERGIDO (À ESQUERDA) E APÓS TRATAMENTO POR <i>SHOT PEENING</i> (À DIREITA).....	83
FIGURA 38: SUPERFÍCIES DAS AMOSTRAS REVESTIDAS COM A LIGA 2 APÓS PROCESSO DE SHOT PEENING. (A) AMOSTRA 2 SP1; (B) AMOSTRA 2 SP2; (C) AMOSTRA 2 SP3; (D) AMOSTRA 2 SP4. AS SETAS INDICAM AS TRINCAS NOS REVESTIMENTOS.	87
FIGURA 39: SUPERFÍCIE DA ÁREA ERODIDA NA AMOSTRA 2 SP3, APÓS OS 4 MINUTOS DE ENSAIO.	88

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: NÍVEIS DE POROS E ÓXIDOS NOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.....	58
GRÁFICO 2: DUREZA DOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.	59
GRÁFICO 3: CURVA DE PERDA DE VOLUME ACUMULADA DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.....	61
GRÁFICO 4: CURVA DE TAXA DE EROÇÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.....	62
GRÁFICO 5: PERDA DE VOLUME ACUMULADA DAS AMOSTRAS APENAS LIXADAS E TOTALMENTE POLIDAS.....	69
GRÁFICO 6: VARIAÇÃO DA TAXA DE EROÇÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.....	70
GRÁFICO 7: PERDA DE VOLUME ACUMULADA NOS REVESTIMENTOS LIXADOS E POLIDOS CONSIDERANDO PERDA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL E COMPARAÇÃO COM REVESTIMENTOS COMO ASPERGIDOS.....	72
GRÁFICO 8: VARIAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS <i>SHOT PEENING</i> E COMO ASPERGIDO.....	76
GRÁFICO 9: VARIAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS <i>SHOT PEENING</i> E COMO ASPERGIDO.....	77
GRÁFICO 10: MICRODUREZA HV _{0,2} NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS <i>SHOT PEENING</i> EM COMPARAÇÃO COM O ESTADO COMO ASPERGIDO.....	79
GRÁFICO 11: MICRODUREZA HV _{0,2} NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS <i>SHOT PEENING</i> EM COMPARAÇÃO COM O ESTADO COMO ASPERGIDO.....	80
GRÁFICO 12: PERDA DE MASSA ACUMULADO DURANTE OS ENSAIOS DE EROÇÃO NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS POR <i>SHOT PEENING</i>	82

GRÁFICO 13: TAXA DE EROÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS POR SHOT PEENING.	82
GRÁFICO 14: PERDA DE MASSA ACUMULADA NAS AMOSTRAS DA LIGA 1 COM <i>SHOT PEENING</i> CONSIDERANDO PERDA CAUSADA PELO TRATAMENTO (MINUTO ZERO).....	84
GRÁFICO 15: PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 TRATADOS COM SHOT PEENING.	85
GRÁFICO 16: VARIAÇÃO DAS TAXAS DE EROÇÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO NAS AMOSTRAS DA LIGA 2 TRATADAS COM SHOT PEENING. ...	85
GRÁFICO 17: PERDA DE MASSA ACUMULADA NAS AMOSTRAS DA LIGA 2 COM SHOT PEENING CONSIDERANDO PERDA CAUSADA PELO TRATAMENTO (MINUTO ZERO).....	86
GRÁFICO 18: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA POROSIDADE DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.....	89
GRÁFICO 19: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NO TEOR DE ÓXIDOS DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.....	89
GRÁFICO 20: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA MICRODUREZA (HV _{0,2}) DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.....	90
GRÁFICO 21: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA PERDA DE MASSA ACUMULADA DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.....	90
GRÁFICO 22: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA POROSIDADE DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.....	91
GRÁFICO 23: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NO TEOR DE ÓXIDOS DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.....	91
GRÁFICO 24: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA MICRODUREZA (HV _{0,2}) DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.....	92
GRÁFICO 25: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA PERDA DE MASSA ACUMULADA (mg) DO REVESTIMENTO DA LIGA 2. ...	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESPECIFICAÇÕES E DIMENSÕES DAS ESFERAS DE AÇO.....	36
TABELA 2: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CONSUMÍVEIS SELECIONADOS (% EM MASSA).....	40
TABELA 3: PARÂMETROS DOS PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO.....	41
TABELA 4: FATORES E NÍVEIS VARIADOS NOS TESTES COM <i>SHOT PEENING</i>	44
TABELA 5: MATRIZ DE EXPERIMENTOS COM <i>SHOT PEENING</i>	44
TABELA 6: PARÂMETROS DO ENSAIO DE <i>SLURRY-JET</i>	51
TABELA 7: VALORES UTILIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DA PERDA DE MASSA GERADA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL APLICADO – AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.	53
TABELA 8: VALORES UTILIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DA PERDA DE MASSA GERADA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL APLICADO – AMOSTRAS COM <i>SHOT PEENING</i>	53
TABELA 9: VALORES DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO NAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.	58
TABELA 10: VALORES DE MICRODUREZA HV0,2 NOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.	59
TABELA 11: PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA DAS AMOSTRAS COMO ASPERGIDAS.	60
TABELA 12: PERDA DE MASSA ACUMULADA DAS AMOSTRAS COMO ASPERGIDAS.	60
TABELA 13: VALORES DE PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.	68
TABELA 14: VALORES DE PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.	68
TABELA 15: RESULTADOS DOS TEORES DE POROS E ÓXIDOS DOS REVESTIMENTOS APÓS <i>SHOT PEENING</i> E NO ESTADO COMO ASPERGIDO.....	75
TABELA 16: VALORES DE DUREZA (HV0,2) NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS COM <i>SHOT PEENING</i>	78

TABELA 17: VALORES DE DUREZA (HV0,2) NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 TRATADOS COM <i>SHOT PEENING</i>	78
TABELA 18: VALORES DE PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS TRATADAS COM <i>SHOT PEENING</i>	80
TABELA 19: VALORES DE PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS TRATADAS COM <i>SHOT PEENING</i>	81

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASM	Sociedade Americana de Materiais, do inglês American Society of Materials
ASP	Processo de aspersão térmica a Arco Elétrico, do inglês <i>Arc Spray Process</i>
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais, do inglês <i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Projeto Assistido por Computador, do inglês Computer-Aided Design
HVFS	Processo de aspersão térmica de Chama de Alta Velocidade, do inglês <i>High Velocity Flame Spray</i>
HVOF	Processo de aspersão térmica Oxi-Combustível de Alta Velocidade, do inglês <i>High Velocity Oxy Fuel</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PPF/PPS	Partícula Parcialmente Fundida / Partícula Previamente Solidificada

SUMÁRIO

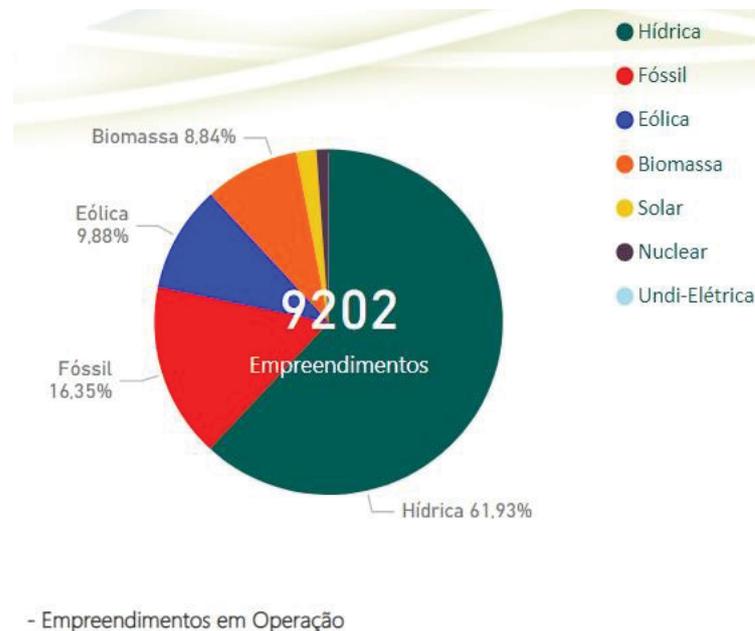
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ASPERSÃO TÉRMICA.....	20
2.1.1 Processo Arco Elétrico (ASP – Arc Spray Process)	24
2.1.2 Processo HVOF – High Velocity Oxy Fuel	26
2.2 DESGASTE EROSIVO.....	28
2.2.1 Mecanismos de Erosão por Partículas Sólidas	30
2.2.2 Revestimentos Resistentes ao Desgaste Erosivo	32
2.3 <i>SHOT PEENING</i>	34
2.3.1 Variáveis do processo de <i>Shot Peening</i>	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 MATERIAL DE CONSUMO	40
3.2 APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS	41
3.3 DEFINIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	42
3.3.1 Amostras com Polimento.....	42
3.3.2 Amostras com <i>Shot Peening</i>	43
3.3.3 Amostras em Estado Como Aspergido	47
3.4 ENSAIOS E ANÁLISES.....	48
3.4.1 Caracterização dos Revestimentos	48
3.4.2 Ensaio de Erosão por Jato de Lama (<i>Slurry Jet</i>).....	50
3.4.3 Verificação da Perda de Massa no Tratamento Superficial.....	52
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	54
4.1 RESULTADOS DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO	54
4.1.1 Morfologia dos Revestimentos – Estado Como Aspergido.....	55
4.1.2 Dureza dos Revestimentos – Estado Como Aspergido.....	58
4.1.3 Ensaio de Erosão por Jato de Lama - Estado Como Aspergido	60
4.2 RESULTADOS DAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.....	66

4.2.1 Ensaio de Erosão por Jato de Lama – Tratamentos por Lixamento e Polimento	67
4.3 RESULTADOS DAS AMOSTRAS COM <i>SHOT PEENING</i>	73
4.3.1 Análise de Morfologia dos Revestimentos Tratados com <i>Shot Peening</i>	73
4.3.2 Durezas dos Revestimentos Tratados com <i>Shot Peening</i>	77
4.3.3 Ensaio de Erosão por Jato de Lama – Tratamento por <i>Shot Peening</i>	80
4.3.4 Análise do Planejamento Taguchi	88
4.3.4.1 Efeito dos Parâmetros de <i>Shot Peening</i> na Liga 1	88
4.3.4.2 Efeito dos Parâmetros de <i>Shot Peening</i> na Liga 2	91
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
6 CONCLUSÕES	94
7 REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, atualmente, 83 % da energia elétrica gerada vem de fontes renováveis, sendo a principal delas a hidráulica, a qual, com 1382 empreendimentos em operação, representa quase 62 % da matriz energética, conforme detalhado na FIGURA 1, com mais de 109 GW de potência instalada (ANEEL, 2021).

FIGURA 1: DIVISÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA POR ORIGEM DE COMBUSTÍVEL.



FONTE: ANEEL (2021).

Para a transformação da energia hidráulica em energia elétrica, é necessária a construção de usinas hidrelétricas, cujos projetos das unidades geradoras dependem de uma série de fatores, sendo os mais importantes a vazão do rio e altura de sua queda, que é a diferença entre o nível de água na barragem (montante) e o nível na saída das turbinas (jusante) (MOURA; MOURA; ROCHA, 2019). A partir dessas informações define-se o tipo de rotor a ser utilizado nas turbinas da usina hidrelétrica, podendo ser do tipo Pelton, para grandes quedas, Francis, para quedas médias e, Kaplan ou Bulbo para quedas reduzidas (MULLER, 2010). Cada modelo, portanto, trabalha exposto a diferentes níveis de volume e pressão de água.

Independente do modelo de rotor hidráulico utilizado, é comum que haja algum tipo de desgaste do material deste em função do constante fluxo de água que

passa através de sua superfície. Os dois principais mecanismos de desgaste atuantes nesse tipo de componente são a cavitação e a erosão abrasiva. O fenômeno de cavitação está diretamente relacionado à formação de bolhas de vapor no líquido e tem relação com o projeto da máquina, como nível da jusante e perfil das pás do rotor (MOURA; MOURA; ROCHA, 2019). A erosão abrasiva depende principalmente das características da água que passa pela máquina, principalmente no que se refere à quantidade e ao tipo de sedimentos abrasivos que estão misturados ao líquido e ao material utilizado, levando em conta os mecanismos de desgaste neste (FINNIE, 1960).

A aplicação de revestimentos por aspensão térmica vem sendo bastante estudada e utilizada para proporcionar o aumento de vida útil dos rotores de turbinas hidráulicas. Diferentes processos de aplicação e ligas podem ser utilizados, em função do tipo de desgaste que ocorre na máquina e do seu nível de agressividade. Há um grande número de publicações que citam a utilização da aspensão térmica para proteção de turbinas hidráulicas contra cavitação, erosão e/ou corrosão, como Vaz et al. (2021), Mayer et al. (2020), Bertuol (2020), Pukasiewicz (2013), Grewal et al. (2013) e Santa et al. (2009). Uma das principais vantagens da aplicação desses revestimentos é eliminação da necessidade de recuperação por soldagem dos rotores (VAZ et al., 2021), o que gera impactos bastante significativos ao material, seja metalurgicamente ou através da geração de deformações ou tensões residuais no componente. Entretanto, uma vez que tais revestimentos atuam como camada de sacrifício, é essencial que haja controle dos níveis de desgaste e paradas para reaplicação destes.

No que se refere ao desgaste erosivo dos rotores, existem inúmeros estudos e, inclusive, aplicações comerciais de revestimentos duros de diferentes ligas, muitas delas com carbonetos de cromo e/ou tungstênio, os quais apresentam resistência significativamente maior à erosão quando comparados com os aços ao carbono ou mesmo os inoxidáveis martensíticos que são constantemente utilizados na fabricação dos rotores (BERTUOL, 2020; SHARMA, GOYAL, KAUSHAL, 2020; SANGAL; SINGHAL; SAINI, 2018; SANTA, BAENA, TORO, 2007; SUGIYAMA et al., 2005). Entretanto, além da composição química, outros fatores como parâmetros de processo de deposição, dureza, teores de poros e óxidos, rugosidade superficial e presença de tensões residuais também podem, eventualmente, afetar o desempenho do revestimento sob desgaste. Existem algumas formas de se reduzir

a rugosidade superficial dos revestimentos, por exemplo, através de lixamento e polimento ou através do jateamento com esferas de aço ou vidro, também conhecido com *shot peening*. Este último também permite o alívio de tensões residuais de tração na superfície, ou até mesmo a criação de tensões compressivas (SUCHARSKI, 2016). Entretanto, não se conhece a real influência dessas técnicas sobre a resistência ao desgaste erosivo dessas camadas aplicadas por aspensão térmica. Este trabalho busca, portanto, verificar a aplicabilidade e a eficiência dos processos de lixamento/polimento e *shot peening* na resistência à erosão de revestimentos de ligas comerciais anti-desgaste de diferentes níveis de dureza, aplicadas pelo processo de aspensão térmica a arco elétrico (ASP – Arc Spray Process).

1.1 JUSTIFICATIVA

Uma característica da utilização de revestimentos aplicados por aspensão térmica em rotores de turbinas de usinas hidrelétricas é a necessidade de intervenções mais frequentes para reaplicação das camadas. Tais paradas normalmente envolvem grandes custos, em função das horas de máquina parada e de toda a mobilização necessária para possibilitar o acesso às máquinas, como esgotamento da sucção, montagem de andaimes, disponibilização de energia elétrica, etc. Portanto, é de grande interesse o estudo de técnicas que possibilitem o aumento da vida útil dos revestimentos, pois isso afetará diretamente o intervalo entre paradas para reaplicação.

Atualmente, quando realizada a aplicação de revestimentos sobre rotores hidráulicos ainda em fábrica, tem sido utilizado, principalmente, o processo de aspensão térmica HVOF (High Velocity Oxy Fuel), o qual, comprovadamente, é capaz de gerar revestimentos mais densos, aderentes e resistentes à erosão em relação àqueles aplicados pelo processo a arco elétrico (VAZ et al., 2021; LIMA, TREVISAN, 2007; SUGIYAMA et al., 2005; ASM INTERNATIONAL, 2004). Entretanto, quando considerada a aplicação em campo, em especial em componentes de grande porte, para os quais a desmontagem é inviável, a aspensão térmica a arco elétrico se torna uma alternativa bastante atrativa, tendo em vista os custos de operação e facilidade de transporte, instalação e operação dos equipamentos. Desta forma, neste trabalho, optou-se pela avaliação da efetividade

de tratamentos superficiais sobre revestimentos aplicados por ASP, visando principalmente o aumento da vida útil de revestimentos aplicados em campo. Ainda, considerando a possibilidade e facilidade de aplicação dentro de uma usina hidrelétrica, foram considerados os tratamentos de lixamento/polimento e *shot peening*, os quais apresentam baixo custo operacional e não demandam de ferramental complexo.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar a influência dos tratamentos de polimento e *shot peening* sobre a resistência ao desgaste erosivo de revestimentos aplicados por aspensão térmica a arco elétrico.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é analisar o impacto da aplicação de tratamentos superficiais de polimento e *shot peening* sobre a resistência à erosão por jato de lama de revestimentos de ligas comerciais de diferentes níveis de dureza, voltadas para aplicações anti-desgaste, aplicados pelo processo de aspensão térmica a arco elétrico.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho, destaca-se:

- Comparar a resposta ao ensaio de erosão por jato de lama de duas ligas, aplicadas por aspensão térmica a arco elétrico, com diferentes níveis de dureza;
- Avaliar as alterações na microestrutura e rugosidade superficial dos revestimentos após tratamento por *shot peening*;
- Verificar a influência do tamanho de esfera, distância e ângulo de jato de *shot peening* na microestrutura e na resistência ao desgaste erosivo dos revestimentos tratados;
- Avaliar a influência do nível de polimento superficial sobre a resistência ao desgaste erosivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica compreende um grupo de técnicas por meio das quais se deposita camadas de materiais metálicos ou não metálicos sobre uma superfície previamente preparada (substrato), com o intuito de modificar suas características superficiais (TAKIMI, 2004; PUKASIEWICZ, 2008; MARIANO, PAREDES, FRARE JÚNIOR, 2007; LIMA, TREVISAN, 1999). A deposição de revestimentos protetores visa principalmente tirar proveito das propriedades específicas destes materiais para aumentar a resistência à corrosão e diminuir as taxas de desgaste e erosão em peças e componentes estruturais sujeitos a ambientes agressivos. Além disto, também tem sido utilizada para revestir peças que necessitam de isolamento térmico e elétrico ou compatibilidade biológica (PAREDES, 1999).

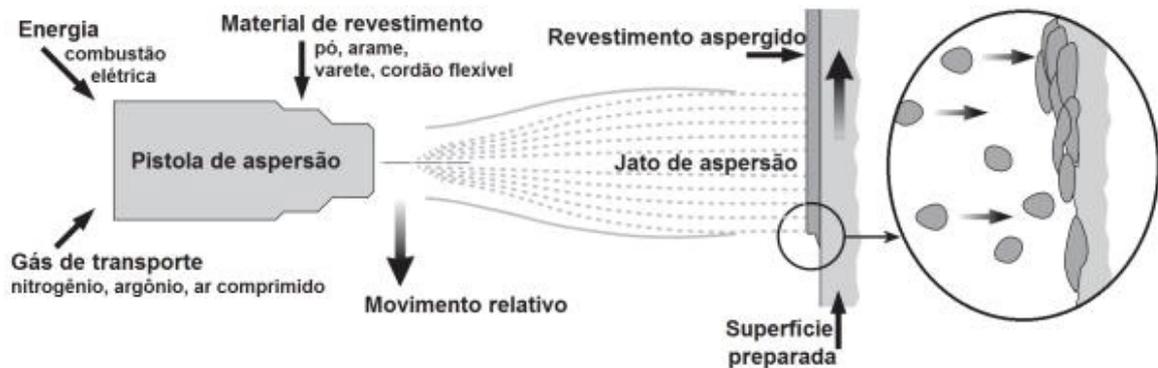
Dentre as vantagens da aspersão térmica, cita-se a grande variedade de materiais que podem ser depositados. Virtualmente, qualquer material que possa se fundir sem sofrer decomposição pode ser utilizado. Outra vantagem é a habilidade da maioria dos processos em aplicar revestimentos a substratos sem significativo aquecimento. Por fim, uma terceira vantagem é a possibilidade de remoção e posterior reaplicação de revestimentos gastos ou danificados, sem alteração dimensional ou de propriedades do componente revestido.

O componente central de um sistema de aspersão térmica é a pistola, a qual converte a energia fornecida, química no caso de combustão ou elétrica nos processos baseados em plasma, em um jato de gases quentes. O material de revestimento é aquecido, eventualmente até a fusão, e acelerado por este jato em alta temperatura e alta velocidade em direção a um substrato, onde, no momento do impacto, as partículas se deformam em forma de lamela gerando as camadas de revestimento (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). Ao colidirem com a superfície sucessivamente e em estado altamente energético, as partículas incidentes se achatam, resfriam e se ancoram mecanicamente nas irregularidades da superfície do material base, assim como sobre as partículas anteriormente depositadas (TAKIMI, 2004; PUKASIEWICZ, 2008; MARIANO, PAREDES, FRARE JÚNIOR, 2007), formando uma camada de estrutura tipicamente lamelar, composta por partículas achatadas, contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade

(PUKASIEWICZ, 2008). A ligação entre as lamelas e o substrato pode ser mecânica, metalúrgica, química, física ou uma combinação dessas formas (LIMA, TREVISAN, 1999).

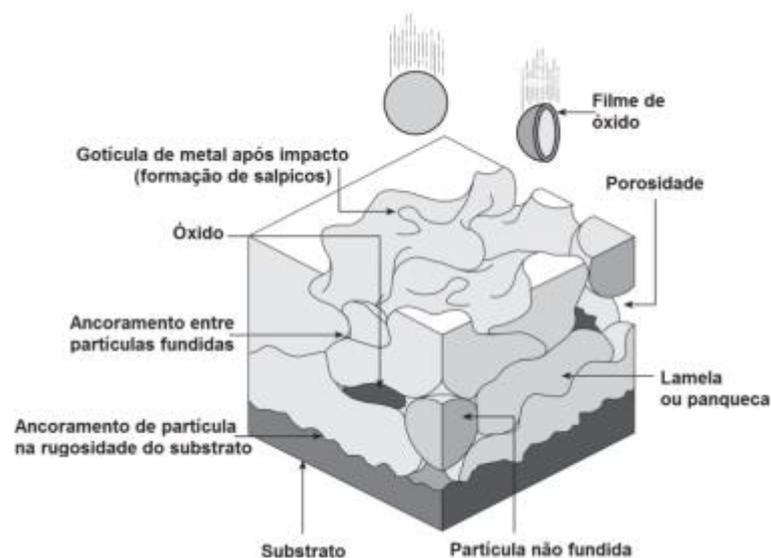
As FIGURA 2 e FIGURA 3 ilustram, respectivamente, o funcionamento básico da aspersão térmica e a característica esperada nas microestruturas dos revestimentos.

FIGURA 2: MODELO ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DA ASPERSÃO TÉRMICA.



FONTE: Adaptado de Oerlikon Metco (2016).

FIGURA 3: MICROESTRUTURA ESPERADA EM REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA.



FONTE: Adaptado de Oerlikon Metco (2016).

A presença de porosidade é comum aos revestimentos aspergidos termicamente e sua quantidade depende do material e das condições de aspersão.

Os poros podem ser grosseiros, normalmente gerados devido ao incompleto preenchimento dos interstícios entre partículas previamente depositadas, ou finos, que estão mais relacionados às características do material aspergido. A porosidade grosseira está relacionada, normalmente, a partículas com fusão incompleta. A porosidade fina entre lamelas é característica da estrutura dos revestimentos, não sendo completamente eliminada através de variações nos parâmetros de processo (LIMA, TREVISAN, 1999).

Um substrato para aspersão térmica deve estar limpo e rugoso. A limpeza da peça visa retirar quaisquer contaminantes que possam prejudicar a posterior adesão da cobertura; a superfície a ser recoberta deve ser limpa com métodos e produtos apropriados (PUKASIEWICZ, 2008; LIMA, 2001). São usados solventes à base de hidrocarbonetos, cloretos e álcoois, entre outros, mas sempre se devem observar riscos à saúde e a compatibilidade entre o solvente e o substrato. A utilização de vapor d'água sob pressão pode ser eficiente em muitos casos. O uso de ultrassom também favorece a limpeza (LIMA, 2001).

Após a limpeza, a superfície deve apresentar uma rugosidade apropriada para que ocorra uma adesão satisfatória do revestimento (LIMA, TREVISAN, 2007). A adesão está diretamente relacionada à quantidade de pontos de ancoramento e à área interfacial específica, portanto, pode-se compreender 'rugosidade adequada' como sendo aquela que permita a elevação do ancoramento e da área contato entre substrato e revestimento.

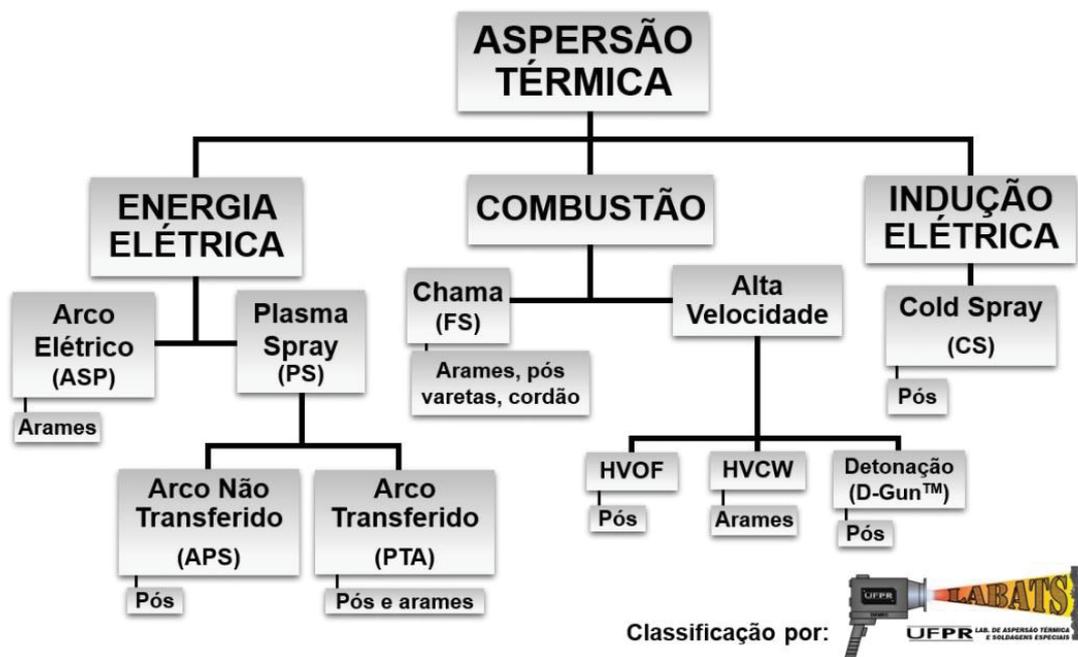
O jateamento abrasivo é o principal método empregado na preparação da superfície de revestimentos finos, porém para maiores espessuras de camada, sujeitas a elevadas tensões e/ou que necessitam de maior resistência, usa-se com frequência usinagem grosseira ou goivagem. Para revestimentos espessos o uso combinado de usinagem grosseira seguida de jateamento abrasivo é empregado para máxima adesão (LIMA, TREVISAN, 2007).

Existem diferentes critérios segundo os quais os processos de aspersão térmica podem ser classificados (SCHIEFLER FILHO, 2004). Essa classificação pode ser feita em função da forma da matéria-prima – na maioria dos casos pó ou arame; da forma de aquecimento – combustão ou eletricidade; da forma de aceleração das partículas – pela própria chama ou por ar comprimido. Além disso, para um mesmo processo pode haver algumas alterações, havendo, por exemplo,

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

Os processos de aspersão térmica normalmente são divididos em dois grandes grupos, de acordo com a fonte usada para o aquecimento do material a ser depositado. O aquecimento pode ser feito por combustão ou eletricidade (AWS, 1985; FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014). A FIGURA 4 indica a classificação dos principais processos de aspersão térmica segundo a geração de energia térmica (método de aquecimento) para fusão ou semi-fusão do material a ser depositado sobre o substrato.

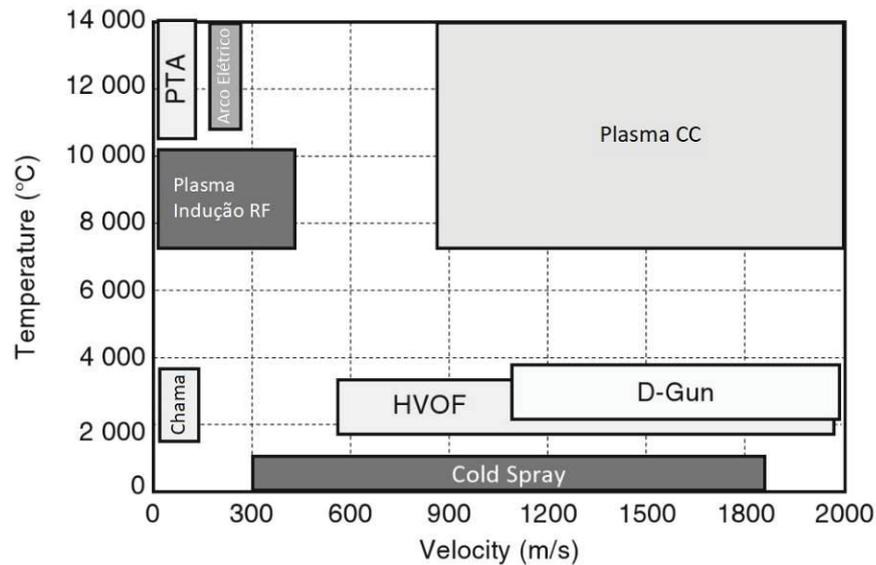
FIGURA 4: PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA.



FONTE: Sucharski (2016).

De acordo com Fauchais, Heberlein e Boulos (2014), as propriedades do revestimento são determinadas pelo material em si e pela forma com que o mesmo é fornecido, e também por um grande número de parâmetros de processo. São esses parâmetros que controlam a temperatura e a velocidade da partícula durante o impacto, exercendo grande importância sobre as características do revestimento. Para diferentes processos de aspersão térmica são esperadas faixas de velocidade e temperatura das partículas lançadas. A FIGURA 5 exibe um diagrama que ilustra os comportamentos.

FIGURA 5: FAIXAS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA.

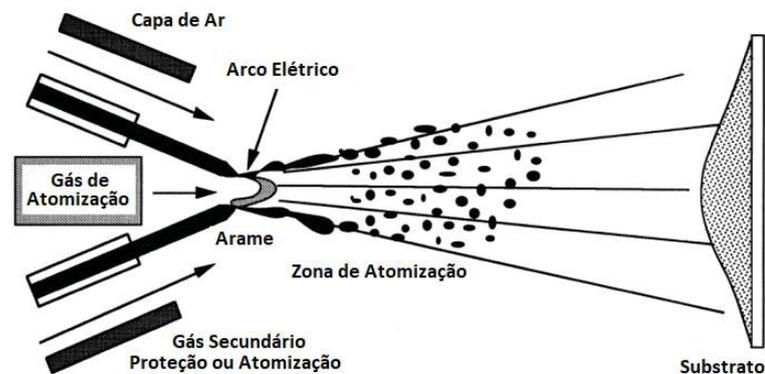


FONTE: adaptado de Fauchais, Heberlein e Boulos (2014).

2.1.1 Processo Arco Elétrico (ASP – Arc Spray Process)

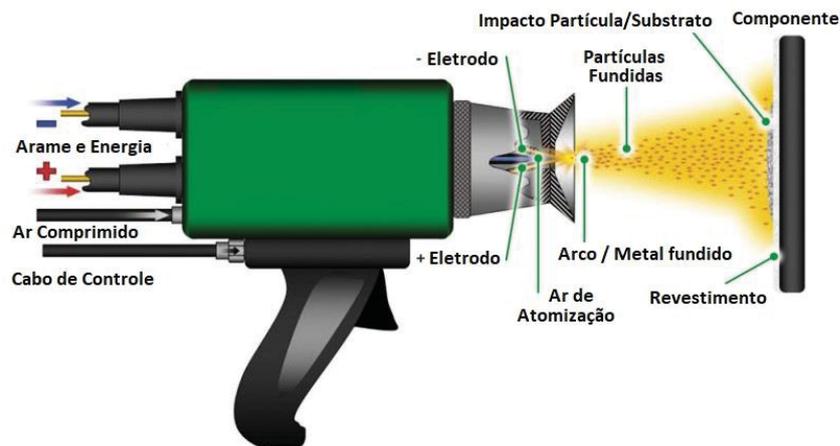
Desenvolvido em meados de 1910, mas com aplicação industrial mais ampla a partir da década de 60, este processo utiliza um arco elétrico de corrente contínua gerado entre as extremidades de dois arames eletrodos consumíveis, os quais são continuamente alimentados e fundidos. Por trás do ponto de contato dos dois arames, é expelido um jato de ar em alta velocidade, com vazão na faixa de 0,8 a 1,8 m³/min, que atomiza o metal fundido no arco elétrico e acelera as partículas fundidas em direção à superfície de um substrato. Durante o impacto, as partículas fundidas se deformam e se solidificam, formando o revestimento (ASM INTERNATIONAL, 2004). As FIGURA 6 e FIGURA 7 ilustram, respectivamente, o funcionamento básico e o formato da pistola do processo arco elétrico.

FIGURA 6: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO.



FONTE: Adaptado de ASM International (2004).

FIGURA 7: DESENHO ILUSTRATIVO DE UMA PISTOLA DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO.



FONTE: adaptado de FST – Flame Spray Technologies (2020).

Fauchais et al. (2014) comentam que a velocidade do gás no processo arco elétrico se dá em poucas centenas de metros por segundo, porém este é pouco aquecido pelo arco, o que permite que a temperatura do substrato seja pouco afetada, ficando na casa das dezenas de °C, sem resfriamento. Os autores ainda detalham que a potência do processo se dá, normalmente, entre 2 e 10 kW, com vazões de ar na faixa de 0,8 a 3,0 m³/min e temperatura do arco elétrico chegando a mais de 20000 K.

Segundo Lima e Trevisan (2007), as temperaturas do arco elétrico excedem facilmente os pontos de fusão dos materiais aplicados, podendo gerar volatilização de alguns metais, como alumínio e zinco. Os autores indicam ainda que as altas

temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, pontos de interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Isso confere ao revestimento boa resistência adesiva e coesiva, podendo chegar a valores acima de 69 MPa para alguns materiais.

Diferentemente de outros processos de aspersão térmica, como chama e plasma, no processo a arco elétrico as partículas já estão fundidas quando entram no jato e começam a resfriar imediatamente após se afastarem da região do arco elétrico. Neste sentido, visando minimizar a oxidação no revestimento, o tempo gasto entre a saída da pistola e a chegada da partícula ao substrato deve ser reduzido através da redução da distância de aspersão e aumento do fluxo de ar comprimido (ASM INTERNATIONAL, 2004).

De acordo com Oerlikon Metco (2018), o processo a arco elétrico apresenta pontos positivos como:

- Equipamentos compactos e independentes;
- Excelente portabilidade para aplicações em campo;
- Processo relativamente frio, que permite aplicação sobre plásticos, compósitos e vidros;
- Não demanda de água de resfriamento nem de gases, com exceção do ar comprimido;
- Altas taxas de deposição;
- Alta simplicidade de operação e manutenção.

O nível de porosidade dos revestimentos aplicados por arco elétrico fica na faixa de 10%, enquanto que o teor de óxidos costuma girar entre 10 e 20%, dependendo do material (VUORISTO, 2014).

2.1.2 Processo HVOF – High Velocity Oxy Fuel

Nestes sistemas o gás combustível e o oxigênio se misturam e são atomizados antes de passar através de orifícios para a câmara de combustão, resultando em uma combustão estável, limpa e uniforme. O material de deposição na forma de pó é introduzido no bocal utilizando gás nitrogênio; o pó é atomizado ao

passar por uma câmara quente tipo venturi onde além de aquecido é acelerado a elevadas velocidades para fora do bocal (MENEZES, 2007).

A alta pressão dentro da câmara de combustão gera um jato de exaustão de alta velocidade. Os gases de combustão fluem através de um bocal para fora da pistola a velocidades supersônicas (MENEZES, 2007). A velocidade de projeção das partículas pelo jato de transferência (fluxo de nitrogênio + propagação na chama) pode atingir 1200 m/s.

Em função destas altas velocidades, o tempo de residência da chama resultante é de poucos milissegundos, o que reduz a oxidação das partículas que estão sendo depositadas e conseqüentemente faz com que os revestimentos possuam baixa quantidade de óxidos (TAKIMI, 2004).

Outra característica deste processo que se destaca é a relativa baixa temperatura da chama (máxima de 2800°C, empregando combustível líquido), quando comparado a outros processos, tal como o processo por plasma (TAKIMI, 2004).

A temperatura alcançada pela chama é determinada pela razão de vazão de oxigênio/gás combustível. Por exemplo, a mistura oxigênio-acetileno (1,5:1 em volume) alcança 3170 °C e oxigênio-propileno (4:1 em volume) alcança 2900 °C (MENEZES, 2007).

Revestimentos obtidos por HVOF apresentam maior qualidade (menor porosidade, elevada adesão), nível de tensões residuais inferiores, eficiência de deposição superior, menor sensibilidade a mudanças no ângulo de aspersão e menos variáveis críticas no processo quando comparados aos processos convencionais de aspersão (PAWLOWSKI, 2008). Deve-se destacar que as tensões residuais referidas anteriormente são as tensões entre lamelas, pois, ao contrário do processo de deposição por soldagem, o processo de aspersão não gera tensões residuais no substrato.

Outras características são listadas abaixo (PAWLOWSKI, 2008):

- Taxa de alimentação de pó: 1,2 – 4,8 kg/h.
- Adesão da camada: > 90 MPa.
- Porosidade: < 1%.
- Espessuras típicas depositadas: 100-300 µm (0,1 – 0,3 mm).
- Pressões típicas do gás combustível: 3-7 atm.

A FIGURA 8 exibe uma ilustração esquemática de uma pistola de aspersão térmica HVOF.



FONTE: Adaptado de Oerlikon (2019).

2.2 DESGASTE EROSIVO

De acordo com a norma ASTM G40-17, a definição do termo desgaste é: “alteração de uma superfície sólida por perda progressiva de material devido a um movimento relativo entre aquela superfície e uma ou mais substâncias em contato”.

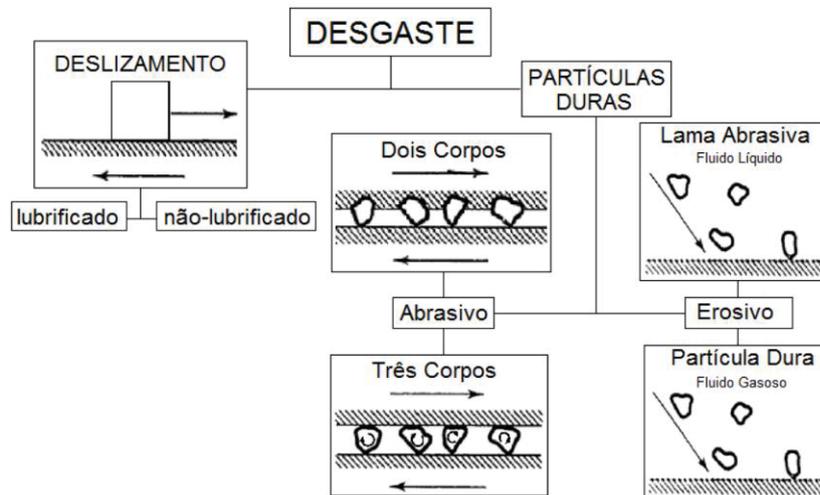
Existem classificações em função do tipo de desgaste, sendo que uma separa em dois grupos: desgaste por deslizamento e desgaste por partículas duras. O primeiro se dá entre duas superfícies deslizando uma sobre a outra, podendo ser lubrificado ou não. O desgaste por partículas duras pode ainda ser separado em desgaste abrasivo e desgaste erosivo (BRAGANÇA, 2016).

No desgaste abrasivo a remoção de material se dá através de partículas ou protuberâncias duras existentes em um contra corpo que são pressionadas e movimentadas contra uma superfície. Normalmente, uma distinção é feita entre “desgaste abrasivo de dois corpos” e “desgaste abrasivo de três corpos”. O primeiro é causado por protuberâncias ou partículas duras presas a um contra corpo; o segundo acontece quando as partículas duras estão livres para rolar e deslizar entre duas superfícies (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Nos casos em que o desgaste é causado por partículas duras que impactam contra uma superfície, carregados por um fluxo de gás ou líquido, tem-se o fenômeno de erosão, desgaste erosivo ou erosão por partículas sólidas. Nos casos em que o fluido de transporte é um líquido, utiliza-se o termo erosão por lama

(HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). A FIGURA 9 ilustra os tipos de desgaste detalhados acima.

FIGURA 9: ILUSTRAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE DESGASTE.

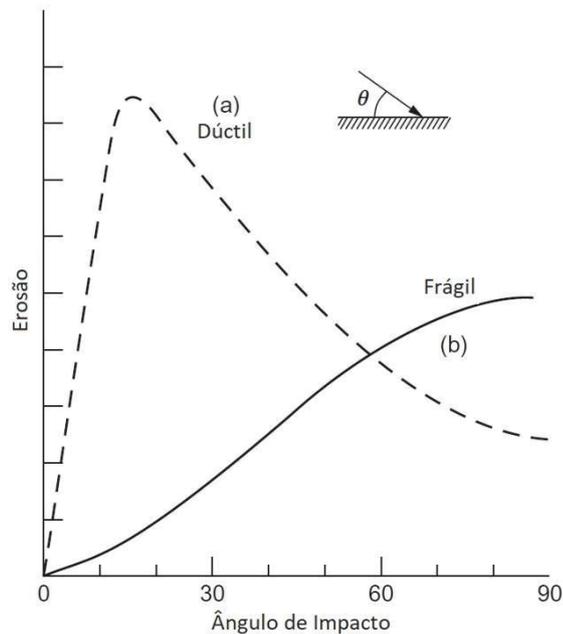


FONTE: Bragança (2016).

Deve-se ressaltar que erosão e abrasão são ambos processos mecânicos de desgaste que apresentam similaridades. Porém, a diferença básica entre os dois se dá no fato que a erosão envolve a transferência de energia cinética da partícula que colide com a superfície, enquanto que na abrasão a perda de material ocorre pela passagem das partículas duras sobre uma superfície sem impacto, mas com um tempo de contato muito maior (JAVAHERI, PORTER e KUOKKALA, 2018).

O desgaste erosivo depende de fatores como velocidade de impacto, formato e orientação da partícula abrasiva e ângulo de impacto em relação à superfície. Este último tem grande influência, principalmente na erosão de materiais dúcteis, que normalmente apresentam desgaste máximo em ângulos de incidência na faixa de 20 a 30 °. Materiais frágeis tendem apresentar comportamento oposto, com maiores taxas de erosão quando o ângulo é normal à superfície (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). A FIGURA 10 exibe o comportamento à erosão abrasiva de materiais dúcteis e frágeis, em relação ao ângulo de impacto.

FIGURA 10: EROSIÃO DE MATERIAIS DÚCTEIS E FRÁGEIS EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE IMPACTO.



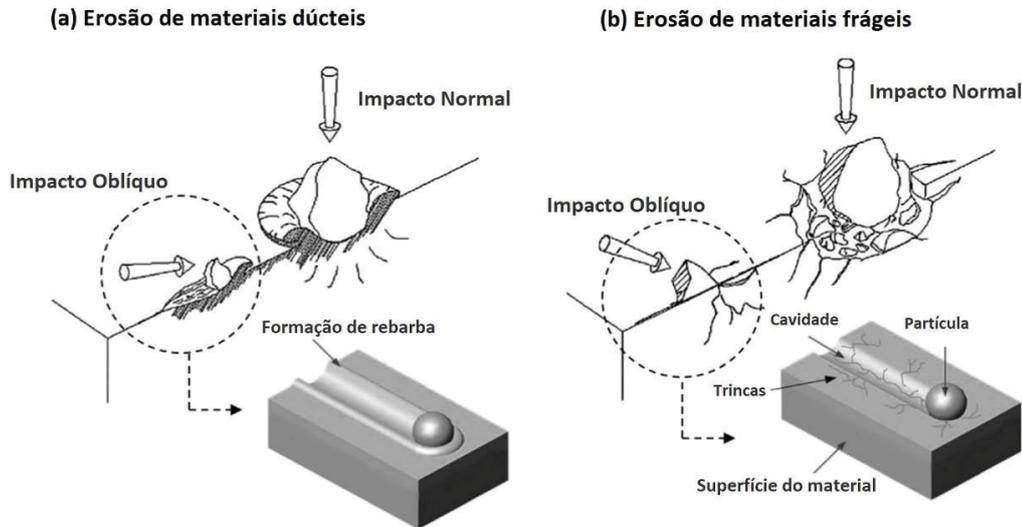
FONTE: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

2.2.1 Mecanismos de Erosão por Partículas Sólidas

Segundo Finnie (1960), de uma forma básica, pode-se separar os mecanismos de erosão em dois tipos principais: dúctil e frágil. Nos materiais dúcteis, a perda de massa ocorre por um processo de deformação plástica, no qual o material é removido por ação de deformação ou corte pela partícula abrasiva. Quando se trata de materiais frágeis, a perda de massa se dá pelo encontro de trincas que se irradiam a partir do ponto de impacto da partícula erosiva.

Wang e Yang (2008) citam os processos de microcorte e microsulcamento no desgaste erosivo de materiais dúcteis. Para materiais frágeis, os autores explicam que a transferência de energia das partículas sólidas para a superfície causa a deformação do material, nucleação e propagação de trincas, resultando no destacamento de pequenas partículas da superfície. A FIGURA 11 ilustra os mecanismos de erosão em função do material (dúctil e frágil) e do ângulo de impacto.

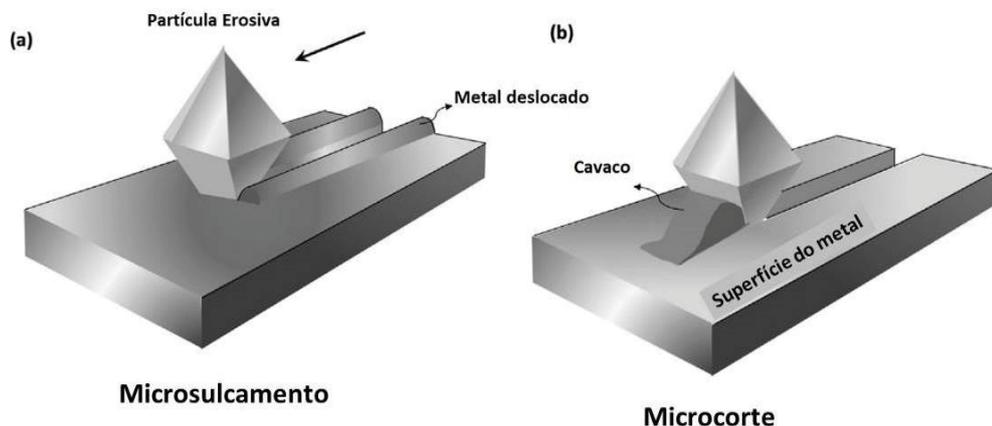
FIGURA 11: FORMAS DE EROSÃO EM MATERIAIS DÚCTEIS (A) E FRÁGEIS (B) E EM DIFERENTES ÂNGULOS DE IMPACTO.



FONTE: Adaptado de Javaheri, Porter e Kuokkala (2018).

Para diferenciar os mecanismos de microsulcamento e microcorte, destaca-se que no primeiro o material não é removido da superfície, ficando acumulado às margens da cavidade gerada na superfície. No corte, um cavaco do material é formado na região frontal da partícula erosiva e um volume de material igual ao volume da cavidade formada é destacado da superfície (JAVAHERI, PORTER e KUOKKALA, 2018). A FIGURA 12 ilustra os dois mecanismos.

FIGURA 12: ILUSTRAÇÃO DOS MECANISMOS DE EROSÃO POR MICROSULCAMENTO E MICROCORTE.



FONTE: Adaptado de Javaheri, Porter e Kuokkala (2018).

Hutchings e Shipway (2017) comentam que, em materiais dúcteis, o desgaste erosivo é associado com o destacamento por ruptura dúctil do metal

deslocado nos pontos de impacto. Porém, apesar de cada impacto deslocar material da indentação formada, normalmente não ocorrerá o destacamento deste até que o mesmo passe por vários ciclos de deformação plástica e se tornar significativamente endurecido por trabalho a frio.

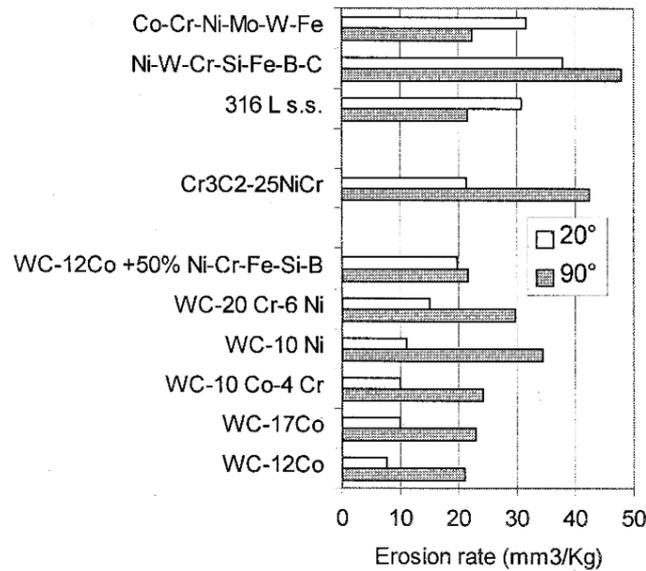
No caso de materiais frágeis, o impacto de uma partícula erosiva causa fratura frágil e a remoção de material se dá pela contínua formação e interligação dessas trincas. Quando o impacto da partícula se dá em uma direção normal à superfície, a formação das trincas é mais severa, acelerando também o processo de erosão, conforme exibido, anteriormente, na FIGURA 10 (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

2.2.2 Revestimentos Resistentes ao Desgaste Erosivo

A resistência de um revestimento à erosão por partículas se dá principalmente pela dureza, teor de porosidade e adesão/coesão do revestimento. As ligas que melhor atendem esses requisitos são as ligas que contêm altos teores de carbonetos de tungstênio ou de cromo. Essas ligas são compostas por uma matriz metálica de cromo, cobalto, níquel, etc., cuja função é ancorar os carbonetos sem permitir que eles se desgarrem durante o desgaste (SUGIYAMA et al., 2005; KUMAR et al., 2018; THAKUR et al., 2011).

Pequenas alterações na porcentagem e tipo dos componentes da matriz podem promover alterações significativas na vida do componente exposto, como é possível observar na FIGURA 13.

FIGURA 13: RESISTÊNCIA À EROÇÃO POR PARTÍCULAS DURAS EM DIFERENTES MATERIAIS.



FONTE: Hawthorne et al. (1999).

BOUSSER (2013) comenta sobre a utilização de materiais multi-fases para o aumento da resistência a erosão por partículas sólidas. Esses sistemas se beneficiam da combinação de diferentes fases com alta dureza, baixa fricção ou alta tenacidade, sendo que um dos modos de se obter tais sistemas é através da aspersão térmica.

Os revestimentos de aspersão térmica são relativamente espessos (> 50 μm) e se comportam sob erosão por partículas sólidas como material bruto, ou seja, sem influência da espessura ou do substrato. Os revestimentos são compostos por duas ou mais fases, sendo uma delas de alta dureza (Al_2O_3 , WC, SiC, CrC e TiC), uma matriz metálica (Co, Cr e NiCr), além de possíveis fases adicionais, como ZrO_2 e YO_3 (BOUSSER, 2013).

Inúmeros outros trabalhos estudam a resistência e modo de desgaste de revestimentos de diferentes composições químicas, aplicados por diferentes processos de aspersão térmica:

- Santa, Baena e Toro (2007) estudaram a erosão por jato de lama em revestimentos aplicados por aspersão térmica a chama e a arco elétrico e em aço inoxidável ASTM A743 grau CA6NM, utilizado em turbinas hidráulicas. Os resultados indicaram maior resistência à erosão dos revestimentos em relação ao aço inoxidável;

- Santa et al. (2009) avaliaram a resistência à erosão por cavitação e por jato de lama de revestimentos a base de níquel, óxido de cromo e carboneto de tungstênio, aplicados pelos processos chama-pó e HVOF. Comparando, novamente, com o aço inoxidável CA6NM, os revestimentos apresentaram maior resistência à erosão por jato de lama, sendo esta, no melhor caso, 16 vezes maior que a resistência do aço não revestido. No caso da erosão por cavitação, entretanto, os revestimentos apresentaram maior desgaste em comparação com o aço CA6NM;
- Grewal et al. (2013) avaliaram o efeito da concentração de areia na erosão de revestimentos a base de níquel com adição de alumina (Al_2O_3), depositados pro processo de chama de alta velocidade (HVFS – *High Velocity Flame Spray*). Novamente, os revestimentos aspergidos demonstraram maior resistência à erosão em relação ao aço CA6NM;
- Mojena et al. (2017) compararam o comportamento à erosão de revestimentos de carboneto de tungstênio e carboneto de cromo, aplicados por processo HVOF. Os autores observaram menores desgastes erosivos nas camadas que apresentaram maior dureza, maior tenacidade à fratura e menores porosidade e rugosidade superficial.

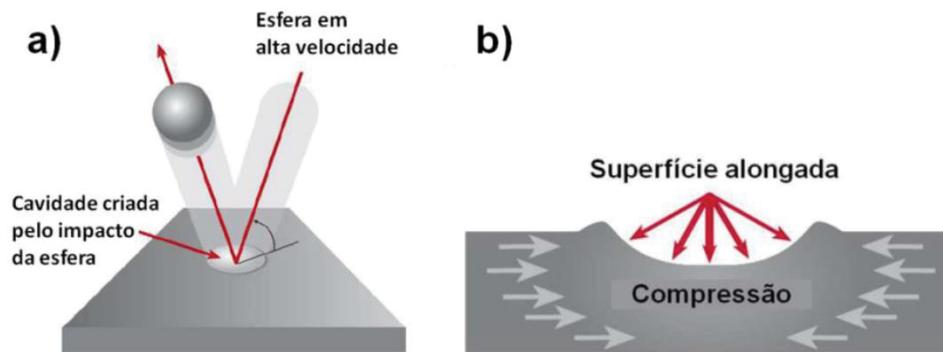
2.3 SHOT PEENING

O *shot peening* é conhecido como um método de trabalho a frio, através do qual tensões compressivas são induzidas nas camadas superficiais de componentes metálicos, através de sucessivos impactos em alta velocidade sobre a superfície metálica, sob condições controladas. Apesar de também gerar limpeza superficial, esta não é sua principal função. O principal objetivo é o aumento da resistência à fadiga, porém também atua no alívio de tensões que contribuem para a formação de trincas de corrosão sob tensão (ASM INTERNATIONAL, 1994).

Segundo Rodrigues (2007), o processo de *shot peening* consiste do jateamento de pequenas esferas contra a superfície a ser tratada, sendo que, com o impacto, a região atingida deforma-se plasticamente por achatamento e se alonga no plano da superfície. Isso faz com que a superfície seja então comprimida pelas regiões abaixo dela, as quais não sofreram influência pelo impacto. A FIGURA 14

ilustra a deformação superficial causada pelo impacto da esfera e a distribuição de tensões abaixo da superfície.

FIGURA 14: PROCESSO DE *SHOT PEENING*. EM (A) GERAÇÃO DA CAVIDADE SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DO IMPACTO DA ESFERA. EM (B) A DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES LOGO ABAIXO DA SUPERFÍCIE.



FONTE: Sucharski (2016).

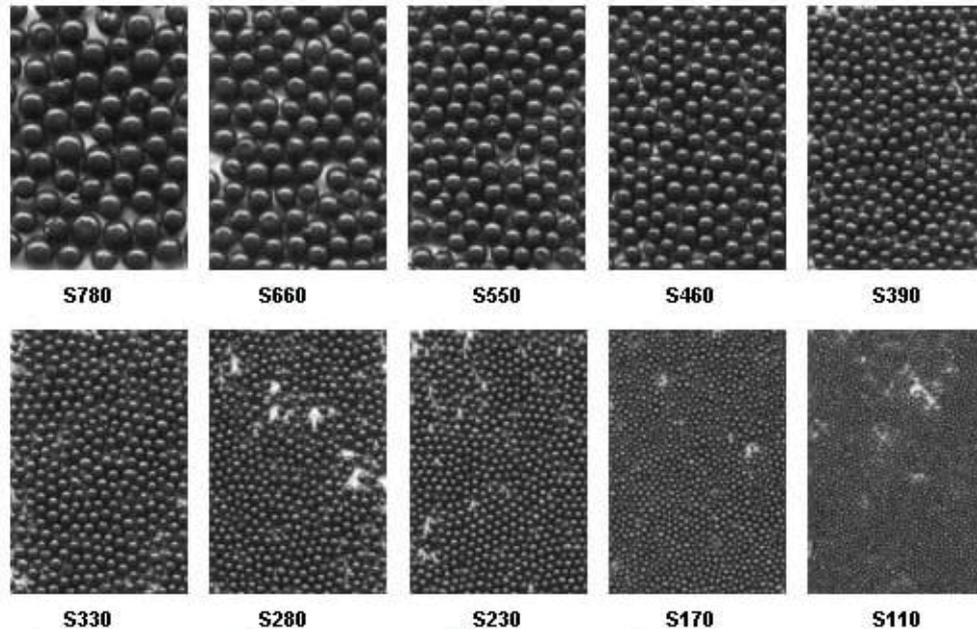
A execução do shot peening pode se dar em cabines convencionais de jateamento abrasivo, como a exibida na FIGURA 15, utilizando, no caso, esferas de aço ou vidro, ou através de equipamentos industriais de maior porte, projetados para exclusivamente para linhas de produção de componentes específicos. A FIGURA 16 exhibe esferas de aço de diferentes tamanhos padronizados. A TABELA 1 detalha as especificações e tamanhos de granalhas esféricas comercialmente disponíveis.

FIGURA 15: GABINETE DE JATEAMENTO UTILIZADO TAMBÉM PARA *SHOT PEENING*. À ESQUERDA, VISÃO EXTERNA E, À DIREITA, VISÃO INTERNA DO EQUIPAMENTO.



FONTE: CMV Construções Mecânicas Ltda. (2020).

FIGURA 16: DIFERENTES TAMANHOS DE ESFERAS DE AÇO UTILIZADAS PARA *SHOT PEENING*.



FONTE: Adaptado de Injermac Jateamento e Pintura (2020).

TABELA 1: ESPECIFICAÇÕES E DIMENSÕES DAS ESFERAS DE AÇO.

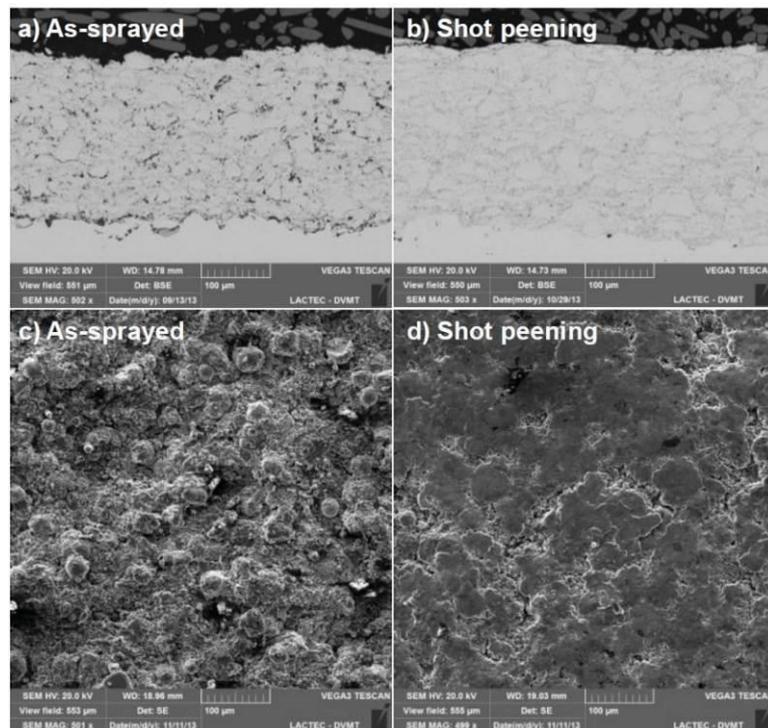
Faixa	Tamanho dos Grãos (mm)	Tamanho Nominal (mm)
S-660	2,36 - 1,70	1,7
S-550	2,00 - 1,40	1,4
S-460	1,70 - 1,18	1,2
S-390	1,40 - 1,00	1,0
S-330	1,18 - 0,80	0,8
S-280	1,00 - 0,71	0,7
S-230	0,85 - 0,60	0,6
S-170	0,71 - 0,42	0,4
S-110	0,50 - 0,30	0,3

FONTE: Norblast Pintura e Jateamento (2021)

Gopi et al. (2020) detalha que o *shot peening* é um processo de trabalho a frio utilizado como acabamento final em componentes para prevenir falhas por fadiga e corrosão sob tensão, prolongando a vida útil do produto. De acordo com os autores, a tensão superficial compressiva dá resistência ao metal, garantindo ao componente acabado resistência a falhas por fadiga, *galling* (desgaste adesivo), corrosão fadiga e erosão por cavitação. No trabalho onde os autores avaliaram a aplicação de *shot peening* sobre aço inoxidável 316L, foram observados aumentos na dureza superficial e na resistência ao desgaste (pino sobre disco) nas amostras tratadas com a respectiva técnica.

Em um trabalho onde avaliaram os efeitos do *shot peening* na morfologia e rugosidade de revestimentos FeMnCrSi, aplicados por aspersão térmica HVOF, Sucharski et al. (2015) verificaram redução acima de 90% nos níveis de porosidade dos revestimentos, acompanhado por redução de cerca de 50 % nas rugosidades superficiais (Ra) e considerável aumento de dureza das camadas de revestimento, sem alteração considerável nas fases presentes nos materiais após o tratamento superficial. A FIGURA 17 exhibe as morfologias da seção transversal e da superfície do revestimento, antes e depois da aplicação de *shot peening*.

FIGURA 17: REVESTIMENTO HVOF ANTES (ESQUERDA) E APÓS (DIREITA) *SHOT PEENING*.



FONTE: Sucharski et al. (2015).

Bertuol et al. (2018) avaliaram a influência dos parâmetros de *shot peening* sobre a dureza superficial do aço ASTM A743-CA6NM. No trabalho, os autores também observaram aumentos nos valores de dureza do material após o tratamento mecânico, na faixa de 8,7 a 29,6 %, sendo que o ângulo de incidência do jato se mostrou bastante importante na eficiência do tratamento. Foi verificado que uma angulação de 60° em relação à superfície jateada gerou maior aumento de dureza. Os autores justificam o aumento da eficiência com a redução dos choques entre as granelhas incidentes com aquelas ricocheteadas na superfície da amostra.

González et al. (2019) estudaram a influência do *shot peening* no desgaste erosivo de ferro fundido branco de alto teor de cromo. Os resultados indicaram que o processo foi capaz de gerar transformação de fase na austenita residual, elevando a dureza na superfície do material e melhorando o desempenho no ensaio de erosão.

2.3.1 Variáveis do processo de *Shot Peening*

Quando se realiza o jateamento por *shot peening* é importante levar em conta alguns fatores, uma vez que são eles que interferem no resultado final do tratamento, sendo: velocidade da granalha; pressão de jateamento; ângulo de ataque; distância de jateamento; tempo de exposição ao tratamento; tipos de granalha (SUCHARSKI, 2016). Os parâmetros, portanto, determinam a quantidade de energia cinética produzida pelo processo (CAO, FATHALLAH, CASTEX, 1995).

Referente ao material das esferas, normalmente se utiliza ferro fundido, cuja dureza varia entre 58 e 68 HRC, aço, com dureza na faixa de 40 a 50 HRC, ou vidro e cerâmica, de dureza entre 50 e 63 HRC (SILVA, 2016). A dimensão das esferas, conforme já detalhado na FIGURA 16 e TABELA 1, também influenciam na energia de impacto e padrão das indentações na superfície.

O ângulo de jateamento, formado entre o jato e a superfície da peça tratada, também influencia no processo. Ângulos maiores, próximos de 90° tendem a aumentar a intensidade do tratamento, porém não se trabalha com ângulo de 90°, pois neste modo as esferas ricocheteadas colidem com aquelas incidentes, reduzindo a eficiência do tratamento (SUCHARSKI, 2016).

A distância do jateamento é definida como a distância entre a saída do jato até a face do material. Sendo assim, quanto maior for esta distância, maior será a área do material submetida ao tratamento, no entanto, menor será a intensidade do ataque destas granalhas (SUCHARSKI, 2016).

O tempo de jateamento também é importante na intensidade do *shot peening*. A princípio, quanto maior o tempo, maior a intensidade, porém até certo limite, onde se obtém a saturação do jateamento (REGO, 2011).

De uma maneira mais geral, dois parâmetros – que são influenciados pelas demais variáveis de processo – são os mais considerados no controle do *shot peening*: a intensidade Almen e a cobertura (MALEKI, UNAI e KASHYZADEH, 2019; ROSALIE, 2019; YANG et al., 2019; WU et al., 2020).

A intensidade Almen está relacionada à curvatura de uma lâmina depois de aplicado o *shot peening*. A lâmina é fabricada em aço SAE 1070 e possui dimensões padronizadas, existindo três espessuras disponíveis (lâminas N, A e C). As lâminas N possuem menor espessura e são utilizadas para processos de menor intensidade, enquanto que as lâminas A e C são empregadas para tratamentos de maior intensidade. Tal intensidade é consequência direta da velocidade com que a granalha atinge a superfície, a qual, por sua vez, é determinada por parâmetros de processo como pressão de ar comprimido (BARRIOS et al., 2007). A FIGURA 18 exhibe o dispositivo utilizado durante o teste de intensidade Almen.

FIGURA 18: DISPOSITIVO UTILIZADO NO TESTE ALMEN.



FONTE: A&B Deburring (2016).

A cobertura é definida como a quantidade de superfície que foi atingida pelo *shot peening*. Uma cobertura completa, ou de 100 %, se dá quando toda a superfície é composta por sulcos sobrepostos, sem que haja áreas no estado original (O'HARA, 1999). Para se conseguir uma cobertura de 200 % basta empregar o dobro do tempo necessário para atingir os 100 % e assim por diante (BARRIOS et al., 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL DE CONSUMO

Tendo em vista o objetivo de avaliar a influência dos tratamentos superficiais de polimento e *shot peening* sobre a resistência ao desgaste erosivo, buscou-se por materiais comerciais cuja aplicação original fosse a formação de revestimentos anti-desgaste. Porém, visando uma análise mais profunda sobre possíveis influências das características específicas de cada revestimento nos resultados, foram selecionadas duas ligas que produziriam camadas com diferentes níveis de dureza.

Tais ligas são formadas a base de ferro, ligadas com carbono, cromo e manganês, com o objetivo de gerar revestimentos de elevada dureza. Abaixo são expostos detalhes de cada liga e a TABELA 2 exhibe a composição química detalhada desses materiais.

- Liga 1: Mira Wire CRV 13 (arame maciço) – Fabricada pela Mira Welding, com teores de carbono e cromo de 0,7 e 9,8 (% em massa), respectivamente, é voltada para aplicação de revestimentos soldados, para demandas que exigem resistência à fricção e desgaste abrasivo (MIRA WELDING, 2019).
- Liga 2: METCO 8222 (arame tubular) – Possuindo altos teores de carbono e cromo, este material, fabricado pela Oerlikon Metco, é específico para aspersão térmica. Gera revestimentos de alta dureza, sendo recomendado para aplicações que demandam resistência à abrasão e erosão, assim como corrosão e oxidação (OERLIKON METCO, 2015).

TABELA 2: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CONSUMÍVEIS SELECIONADOS (% EM MASSA)

Material	Fe	C	Si	Mn	Cr	Outros (máx.)
Liga 1	Bal.	0,7	2,5	0,8	9,8	-
Liga 2	Bal.	5,0	-	1,0	28,0	1,5

FONTE: Mira Welding (2019) e Oerlikon (2015).

As duas ligas foram fornecidas na forma de arame de diâmetro 1,6 mm, sendo a METCO 8222 em arame tubular e a Mira Wire CRV 13 e arame maciço. Os

dois materiais acima foram depositados sobre corpos de prova de aço ASTM 1020 com espessura de 4,8 mm e dimensões de aproximadamente 100 x 40 mm.

3.2 APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Para a deposição utilizou-se equipamento Metallisation S350A(16), com pistola ARC 340, regulado com os parâmetros de processo exibidos na TABELA 3. Esses parâmetros foram definidos a partir de testes preliminares de deposição, onde se buscou a estabilidade do arco elétrico durante a aplicação e a formação de revestimentos homogêneos e com baixos níveis de porosidade e oxidação. As diferenças entre alguns dos parâmetros das ligas 1 e 2 são esperadas e ocorrem em função das diferentes composições químicas das ligas e também por se tratar de um arame maciço (Liga 1) e um arame tubular (Liga 2). A aplicação dos revestimentos foi realizada de maneira robotizada, com auxílio de robô de seis eixos deslocável sobre trilho marca EngeMovi, exibido na FIGURA 19.

TABELA 3: PARÂMETROS DOS PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO.

Material	Liga 1	Liga 2
Tensão (V)	33	33
Corrente Elétrica (A)	160	200
Pressão de Ar (bar)	6,0	6,0
Distância de Aspersão (mm)	130	110
Velocidade da Pistola (mm/s)		90
Distância entre Passes (mm)		18

FONTE: O autor (2021).

FIGURA 19: APLICAÇÃO ROBOTIZADA DOS REVESTIMENTOS.



FONTE: O autor (2021).

A preparação superficial das chapas para a aplicação dos revestimentos foi igual para as duas ligas, sendo realizada através de jateamento abrasivo com óxido de alumínio de grão #20, até a obtenção de superfície com grau de limpeza Sa3 e rugosidade Ra na faixa de 7,0 a 8,0 μm e Rt entre 50 e 60 μm .

3.3 DEFINIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

3.3.1 Amostras com Polimento

Para a avaliação da influência do polimento sobre a resistência ao desgaste, foram utilizadas, de cada um dos revestimentos avaliados, seções de cerca de 40 x 25 mm preparadas em duas maneiras diferentes: polimento completo e lixada. A preparação completa se deu através do lixamento da superfície do revestimento em politriz nas lixas de grão #220, #320, #400, #600, #800 e #1200, seguido por polimento com pasta de diamante de granulometria 3 μm , obtendo assim um aspecto espelhado das amostras. Na preparação lixada, as amostras revestidas passaram apenas pela etapa de lixamento em grão #220. Esta forma de preparação, além de permitir uma avaliação gradual entre os estados como depositado e polido dos revestimentos, representa uma alternativa de pós-processamento de fácil

execução em campo ou em fábrica, através de esmerilhadeiras montadas com discos de lixa tipo “flap-disc”.

As amostras polidas e lixadas foram identificadas conforme abaixo:

- 1 LX – Liga 1 apenas lixada;
- 1 PO – Liga 1 com polimento completo;
- 2 LX – Liga 2 apenas lixada;
- 2 PO – Liga 2 com polimento completo

Com o objetivo de avaliar a perda de massa gerada durante os processos de pós-tratamento superficial dos revestimentos, foram realizadas verificações de massa das amostras antes e depois dos processos de lixamento e polimento completo. Essa informação é importante durante as análises dos resultados, pois é interessante avaliar se um possível ganho em resistência ao desgaste gerado pelos pós-tratamentos compensa a quantidade de material perdida durante a execução do mesmo. A verificação das massas foi realizada em balança analítica marca Shimadzu modelo AW220.

3.3.2 Amostras com *Shot Peening*

Além da comparação entre os diferentes métodos de tratamento superficial, buscou-se também verificar a influência dos parâmetros do processo de *shot peening* sobre a resistência a erosão. Assim, definiu-se uma matriz de experimentos através do planejamento experimental de Taguchi, que é um método de desenho de experimentos que permite avaliar como diferentes parâmetros afetam a média e a variância de uma característica de desempenho do processo. A definição de experimentos proposto por Taguchi envolve o uso de matrizes ortogonais, para organizar os parâmetros que afetam o processo, e os níveis, que devem ser variados, permitindo a coleta de dados necessários para determinar quais os fatores que mais afetam a qualidade do produto, com uma quantidade mínima de experimentos, poupando assim, tempo e recursos (LIRA, 2012; ROY, 2001; TAGUCHI, 1990).

Neste caso, foram considerados três fatores (parâmetros de processo) sendo variados em dois níveis (baixo e alto), o que permite considerar um arranjo

ortogonal L4, conforme exibe a TABELA 4. O tipo de esfera foi variado para analisar a influência do diâmetro da granalha nas alterações superficiais do revestimento e na resposta ao ensaio de erosão. Os fatores distância e ângulo foram considerados nos testes, pois, em muitos casos, a aplicação do *shot peening* é executada manualmente, o que torna difícil a manutenção desses parâmetros durante o processo. Portanto, torna-se interessante avaliar se alterações de ângulo e distância do jato exercem influência sobre o resultado final do *shot peening*.

TABELA 4: FATORES E NÍVEIS VARIADOS NOS TESTES COM *SHOT PEENING*.

Fator	Nível 1	Nível 2
Esfera	S110	S230
Distância (mm)	100	180
Ângulo (°)	60	80

FONTE: O autor.

Os fatores e níveis detalhados na TABELA 4 foram repetidos para as duas ligas de revestimento avaliadas, sendo definida a matriz de experimentos exibida na TABELA 5. A liga do revestimento aqui não é considerada um fator do planejamento Taguchi. Neste caso, houve apenas a repetição do mesmo planejamento para duas ligas diferentes.

TABELA 5: MATRIZ DE EXPERIMENTOS COM *SHOT PEENING*.

Experimento	Revestimento	Esfera	Distância (mm)	Ângulo (°)
1 SP1	Liga 1	S110	100	60
1 SP2	Liga 1	S110	180	80
1 SP3	Liga 1	S230	100	80
1 SP4	Liga 1	S230	180	60
2 SP1	Liga 2	S110	100	60
2 SP2	Liga 2	S110	180	80
2 SP3	Liga 2	S230	100	80
2 SP4	Liga 2	S230	180	60

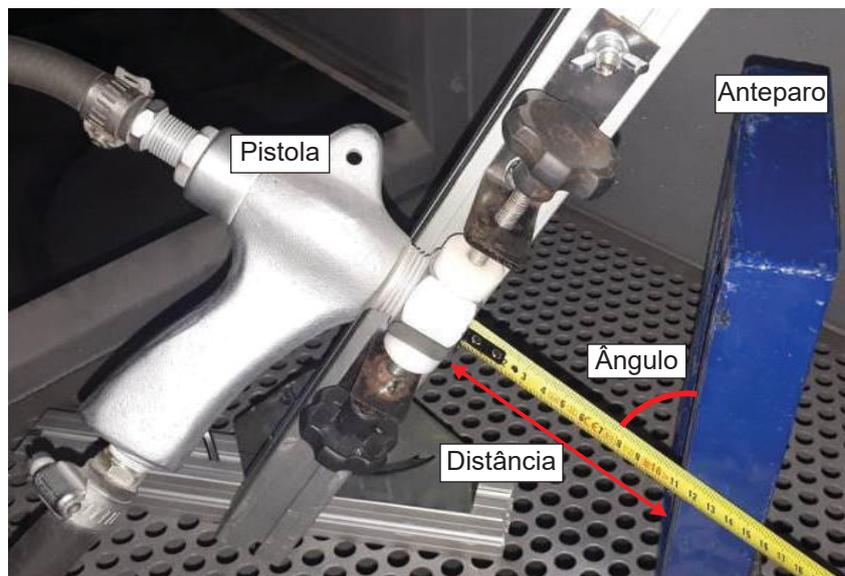
FONTE: O autor.

As respostas dadas pelo método de Taguchi permitem verificar, em forma de gráficos, a influência que todos os fatores estudados exercem sobre as médias, a intensidade dessa influência e qual nível influencia positivamente sua resposta. Já a análise da variância, resultante da comparação das médias das respostas do arranjo ortogonal, calculado sobre a soma das respostas para cada nível em cada fator,

revela se existe significância nos fatores, permitindo assim haver uma validação estatística da interpretação dos gráficos de influência (LIRA, 2012; TAGUCHI, 1990).

Para a execução do *shot peening*, foi utilizada uma cabine de jateamento abrasivo, com abastecimento interno (recirculação). No interior dessa cabine foi construído um dispositivo para fixação da pistola de jateamento que permitisse a regulagem do ângulo do jato e da distância deste até a superfície a ser tratada. A FIGURA 20 exhibe o aparato, o qual foi regulado em função das informações da TABELA 5, onde o ângulo considerado é aquele entre o jato incidente e a superfície da amostra tratada. A distância considerada foi a aquela medida entre a saída da pistola e a superfície da amostra, ou seja, a distância de voo das partículas entre a pistola e a peça. A pressão do ar comprimido, mantida a mesma para todos os casos, foi de 7,0 bar.

FIGURA 20: DISPOSITIVO PARA REGULAGEM DO ÂNGULO E DISTÂNCIA DE SHOT PEENING.



FONTE: O autor (2021).

Conforme se observa na figura acima, durante a execução do *shot peening* a pistola foi mantida fixa. Neste caso, portanto, as amostras revestidas foram movimentadas, manualmente, em relação ao jato. Para manter o ângulo e a distância, a superfície posterior da chapa revestida era apoiada sobre o anteparo exibido na FIGURA 20.

O *shot peening* foi realizado sobre a área total de cada amostra revestida de 100 x 40 mm. Neste caso, para garantir que houvesse a cobertura completa da superfície, antes de iniciar o processo foi aplicado um contraste branco sobre as superfícies das amostras. Este contraste (Metal-Chek Super Magna Contraste 104) é utilizado no ensaio não destrutivo de partículas magnéticas, facilitando a observação das indicações deste. O produto gera uma fina camada branca, de adesão reduzida, sobre a superfície. Durante o processo de *shot peening*, o impacto das esferas de aço remove este contraste, indicando assim que houve cobertura em uma determinada área. A FIGURA 21 exibe duas amostras revestidas após aplicação do contraste.

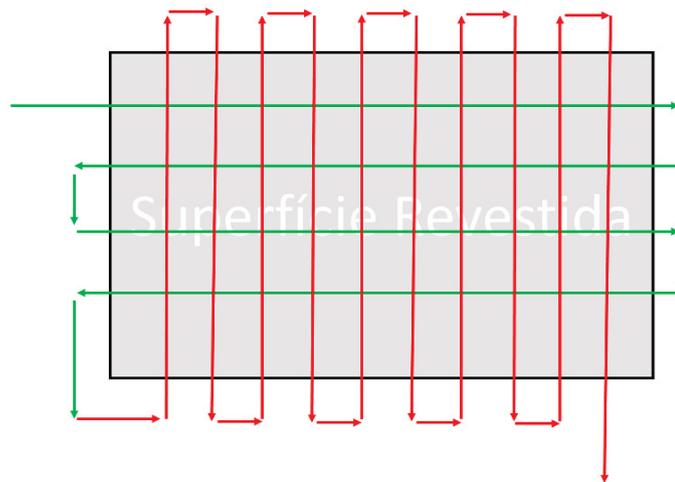
FIGURA 21: AMOSTRAS REVESTIDAS, ANTES (SUPERIOR) E APÓS (INFERIOR) A APLICAÇÃO DO CONTRASTE.



FONTE: O autor (2021).

Durante a execução do *shot peening*, as amostras foram movimentadas manualmente de forma que a superfície revestida se deslocasse em relação ao jato de forma semelhante àquela ilustrada na FIGURA 22. A velocidade de deslocamento variou em função da facilidade da remoção do contraste pelo jato, de modo com que a remoção completa ocorresse ao longo de uma única movimentação completa (movimentos horizontais e verticais). Em seguida, mesmo havendo a remoção do contraste, a movimentação completa foi repedita, de forma a garantir a cobertura de 200 % do *shot peening* ao longo das superfícies. Este procedimento foi o mesmo para todas as amostras tratadas por tal processo. Também, assim como nas amostras de polimento, para cada caso, foi verificada a massa antes e depois do tratamento, de modo a verificar eventual remoção de material durante o processo.

FIGURA 22: TRAJETÓRIA DO JATO DE *SHOT PEENING* NA SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS REVESTIDAS.



FONTE: O autor (2021).

3.3.3 Amostras em Estado Como Aspergido

Como referência para as comparações, uma amostra de cada revestimento foi mantida no estado “como depositado”, ou seja, mantendo o aspecto e demais características originais da aplicação, sem execução de polimento, lixamento ou *shot peening*. Neste caso, as amostras foram denominadas como:

- 1 CA – Revestimento Liga 1 como aspergido
- 2 CA – Revestimento Liga 2 como aspergido

3.4 ENSAIOS E ANÁLISES

3.4.1 Caracterização dos Revestimentos

Para auxiliar na avaliação do comportamento ao processo erosivo, as amostras revestidas com e sem tratamentos posteriores foram caracterizadas antes, durante e após os ensaios de erosão, sendo utilizadas as seguintes análises e equipamentos:

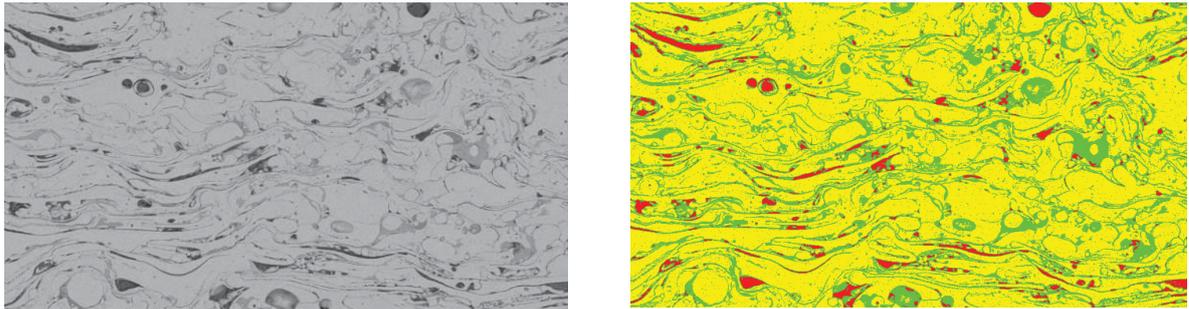
- Medição de rugosidade superficial, através de rugosímetro digital portátil Mitutoyo SurfTest SJ-210 e perfilômetro ótico 3D Taylor Hobson CCI Lite;
- Morfologia da seção transversal dos revestimentos através de preparação metalográfica e análise em microscópio ótico Olympus BX51M e software de análise de imagens Stream Essentials;
- Quantificação de poros e óxidos por análise de imagens.
- Morfologia de superfície através de perfilômetro ótico 3D Taylor Hobson CCI Lite e microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan Vega 3;
- Pesagem em balança analítica Shimadzu AW220;
- Medição de microdureza Vickers em microdurômetro EmcoTest DuraScan 20 G5, com aplicação de carga de 200 g.

Para a análise das seções transversais dos revestimentos, a preparação das amostras se deu através de corte em cortadeira metalográfica Arotec Arocor 100, seguido por embutimento a quente, lixamento nas granas #220, #320, #400, #600, #800 e #1200 e polimento com pasta de diamante nas granulometrias 3 μm e 1 μm .

Para a quantificação de poros e óxidos, foram obtidas imagens das seções transversais dos revestimentos em MEV, com ampliação de 500 X e convertidas para escala de cinza em 8 bits. Na sequência, utilizando o software de análise de imagens Stream Essentials, através da técnica de *threshold*, definiu-se uma determinada cor para cada intervalo de tons de cinza referente aos três constituintes: lamelas metálicas, óxidos e poros. A FIGURA 23 exibe um exemplo de imagem utilizada na contagem de óxidos e poros. Ao lado esquerdo tem-se a imagem original em tons de cinza 8 bits. Neste caso, definiram-se as áreas brancas como lamelas metálicas, as áreas pretas como poros e as áreas em cinza como

óxidos. Na imagem da direita, altera-se os intervalos de tons de cinza para cores de maior contraste, sendo amarelo para as lamelas, vermelho para os poros e verde para os óxidos. A partir desta imagem, o software calcula a porcentagem em área de cada constituinte.

FIGURA 23: EXEMPLO DE IMAGEM UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE ÓXIDOS E POROS DOS REVESTIMENTOS.

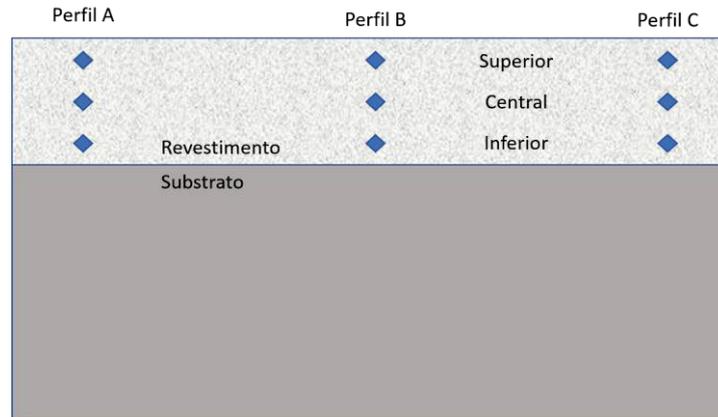


FONTE: O autor (2021).

Para tornar as medições de poros e óxidos mais abrangentes, para cada caso avaliado, o procedimento acima foi repetido em três imagens obtidas ao longo da mesma amostra e os valores médios das três medições foram considerados como os resultados oficiais de porosidade e oxidação.

A verificação de dureza nos revestimentos no estado como aspergido foi executada através da realização de três perfis (A, B e C) de três medidas ao longo das seções transversais, sendo uma identificação próxima à superfície da camada (Superior), outra na região central (Central) e a terceira próxima à interface com o substrato (Inferior). A FIGURA 24 ilustra a posição das medidas. Foi utilizada carga de 200 g (microdureza), pois carregamentos maiores geraram trincas nos revestimentos. A mesma proposta foi utilizada nos revestimentos que passaram por *shot peening*, porém, nesses casos, foram realizados dez perfis ao longo da espessura, para melhor validar a influência do tratamento sobre a camada aspergida.

FIGURA 24: POSIÇÕES DAS MEDIÇÕES DE MICRODUREZA NOS REVESTIMENTOS.



FONTE: O autor (2021).

3.4.2 Ensaio de Erosão por Jato de Lama (*Slurry Jet*)

Para avaliar a resposta dos revestimentos ao desgaste erosivo, foram realizados ensaios de erosão por jato de lama, utilizando-se do equipamento DUCOM *Slurry Jet Tester*, FIGURA 25, instalado no campus de Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PG). Este equipamento produz um jato de água misturado com um material abrasivo, no caso, areia, que é direcionado contra a superfície do material ensaiado. A velocidade do jato, tipo e taxa de alimentação de abrasivo e ângulo de incidência em relação à superfície ensaiada são os fatores que podem ser variados no ensaio. A TABELA 6 exibe os parâmetros de ensaio utilizados.

FIGURA 25: EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE EROÇÃO POR JATO DE LAMA - SLURRY JET TESTER.



FONTE: O autor (2021).

TABELA 6: PARÂMETROS DO ENSAIO DE *SLURRY-JET*.

Parâmetros	Especificação
Ângulo do jato	90 °
Erodente	Areia 300 (200 – 400 µm)
Diâmetro do bico	4,0 mm
Fluxo de erodente	1790 g/min (30 rpm)
Velocidade do jato	25,5 m/s (750 rpm)
Distância bico – superfície	50 mm
Intervalos de ensaio	60, 120, 180 e 240 s

FONTE: O autor (2021).

Para a realização dos ensaios, foram necessários corpos de prova de 40 x 25 mm. Conforme citado anteriormente, no caso das amostras polida e lixada, tais tratamentos superficiais foram realizados em seções já cortadas na devida dimensão. Para as chapas que passaram por *shot peening*, o corte foi posterior ao tratamento.

A perda de massa ao longo dos intervalos do ensaio foi verificada através da pesagem dos corpos de prova em balança analítica. Neste caso, para evitar erros de leitura em função de possível presença de partículas abrasivas incrustadas ou presença de umidade, antes da pesagem cada corpo de prova passou por limpeza em cuba ultrassônica, imerso em álcool etílico absoluto, durante 5 minutos. Na sequência era realizada a secagem com auxílio de soprador térmico.

Levando em conta que este trabalho compara dois revestimentos de ligas de composição química diferentes, durante as análises dos resultados dos ensaios de desgaste em que há comparação entre os dois materiais, é importante que se leve em consideração a densidade de cada um. Comparar apenas a variação de massa entre revestimentos com densidades diferentes acaba mascarando os resultados, pois não se sabe se aquele que apresentou maior perda de massa realmente desgastou mais ou se, para um mesmo volume, o este tem maior massa.

Para verificar a densidade de cada revestimento, foram cortadas três amostras, sendo: uma da chapa utilizada como substrato, jateada, mas sem revestimento; uma da chapa revestida com a Liga 1 e; uma da chapa revestida com a Liga 2. Os cortes foram feitos de modo a obter amostras de aproximadamente 25 x 10 mm. Na sequência, utilizando micrômetro de resolução 0,01 mm, cada amostra teve seus quatro lados medidos e suas respectivas áreas calculadas com auxílio de software CAD Autodesk Inventor. Também através de micrômetro, foram tomadas medidas de espessura de cada amostra, de forma a se obter uma média aritmética da espessura de cada um dos revestimentos a partir da diferença em relação à chapa não revestida. Por fim, foi realizada a pesagem de cada amostra e, através da diferença em relação à massa esperada para o substrato, determinadas as massas de cada revestimento.

De posse da área, espessura e massa de cada revestimento, calculou-se o volume e as respectivas densidades de cada camada (Liga 1 e Liga 2). Os dois revestimentos apresentaram valores similares de densidade sendo:

- Revestimento Liga 1: 5,565 mg/mm³
- Revestimento Liga 2: 5,717 mg/mm³

Durante as análises dos resultados, os valores acima serão utilizados para obtenção das curvas de variação de volume de cada revestimento ao longo dos ensaios de erosão por jato de lama.

3.4.3 Verificação da Perda de Massa no Tratamento Superficial

Uma vez que os próprios processos utilizados como forma de tratamento superficial dos revestimentos (lixamento, polimento e *shot peening*) também geram redução de massa das camadas depositadas, se faz importante a avaliação da quantidade de material perdida em função destes. Esta análise servirá para certificar

se um possível aumento da resistência ao desgaste é significativo o bastante para compensar o material removido durante o tratamento superficial.

Para a definição desta perda de massa inicial, cada amostra foi pesada antes e depois de seus respectivos tratamentos superficiais. Porém, essa diferença não poderia ser considerada diretamente junto aos resultados do ensaio de erosão, pois este atinge uma área específica da amostra e não toda sua superfície. Desta forma, a partir das dimensões de cada peça, foi calculada a perda de massa (gerada pelo tratamento) por unidade de área (mg/mm^2). O valor obtido foi então multiplicado pela área aproximada do jato erosivo do ensaio de erosão por jato de lama – onde se considerou um diâmetro fixo de 10,0 mm – obtendo-se assim a perda de massa na área de ensaio, referente ao tratamento superficial aplicado. As TABELA 7 e TABELA 8 exibem, respectivamente, os valores considerados e calculados para a obtenção da perda de massa no “minuto zero” (antes do ensaio de erosão) das amostras lixadas / polidas e tratadas com *shot peening*.

TABELA 7: VALORES UTILIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DA PERDA DE MASSA GERADA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL APLICADO – AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.

Amostra	Perda de Massa Total (mg)	Área Total (mm^2)	Perda por área (mg/mm^2)	Área de Ensaio (mm^2)	Perda de massa na área de ensaio “Min. 0” (mg)
01 LX	494,20	941,36	0,525	78,54	41,23
01 PO	688,00	1023,28	0,672		52,81
02 LX	493,30	959,11	0,514		40,40
02 PO	565,00	970,36	0,582		45,73

FONTE: O autor (2021).

TABELA 8: VALORES UTILIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DA PERDA DE MASSA GERADA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL APLICADO – AMOSTRAS COM SHOT PEENING.

Amostra	Perda de Massa Total (mg)	Área Total (mm^2)	Perda por área (mg/mm^2)	Área de Ensaio (mm^2)	Perda de massa na área de ensaio “Min. 0” (mg)
01 SP1	203,9	3880,0	0,053	78,54	4,127
01 SP2	175,6	4000,0	0,044		3,448
01 SP3	113,4	3840,0	0,030		2,319
01 SP4	184,5	3900,0	0,047		3,716
02 SP1	330,4	3880,8	0,085		6,687
02 SP2	334,2	3782,8	0,088		6,939
02 SP3	183,1	3920,0	0,047		3,669
02 SP4	240,8	3880,8	0,062		4,873

FONTE: O autor (2021).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para uma melhor organização das informações, a exposição dos resultados será dividida inicialmente pela forma de tratamento aplicada aos revestimentos, começando pelas amostras mantidas no estado como aspergido, seguida pelos revestimentos polidos e lixados e, por fim por aqueles tratados com *shot peening*. Neste primeiro momento, para cada caso específico, serão colocados e discutidos os resultados obtidos para cada uma das duas ligas avaliadas, considerando os números obtidos nos ensaios de erosão por jato de lama e as morfologias superficial e de seção transversal das camadas aspergidas antes e depois dos ensaios, comparando isoladamente com os resultados dos revestimentos no estado como aspergido.

Na sequência, será feita uma abordagem global dos resultados, de forma a comparar os dados obtidos de cada tipo de tratamento e chegar a conclusões sobre a viabilidade e eficácia de cada um no aumento da resistência à erosão dos revestimentos aplicados por aspersão térmica a arco elétrico.

4.1 RESULTADOS DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO

A FIGURA 26 exibe amostras após a aplicação dos revestimentos da Liga 1 (imagem esquerda) e da Liga 2 (imagem direita). Ambas apresentaram revestimentos uniformes, com características comuns ao processo de deposição por arco elétrico, caracterizado, em especial, pela alta rugosidade superficial, que neste caso, se apresentou com valor médio de Ra em 17,690 μm para a Liga 1 e 16,214 μm para a Liga 2. As regiões inferiores de cada amostra foram os locais de fixação durante a aplicação da aspersão térmica, portanto, não apresentam revestimento e não foram consideradas nas análises e ensaios.

FIGURA 26: AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. À ESQUERDA: LIGA 1. À DIREITA: LIGA 2.



FONTE: O autor (2021).

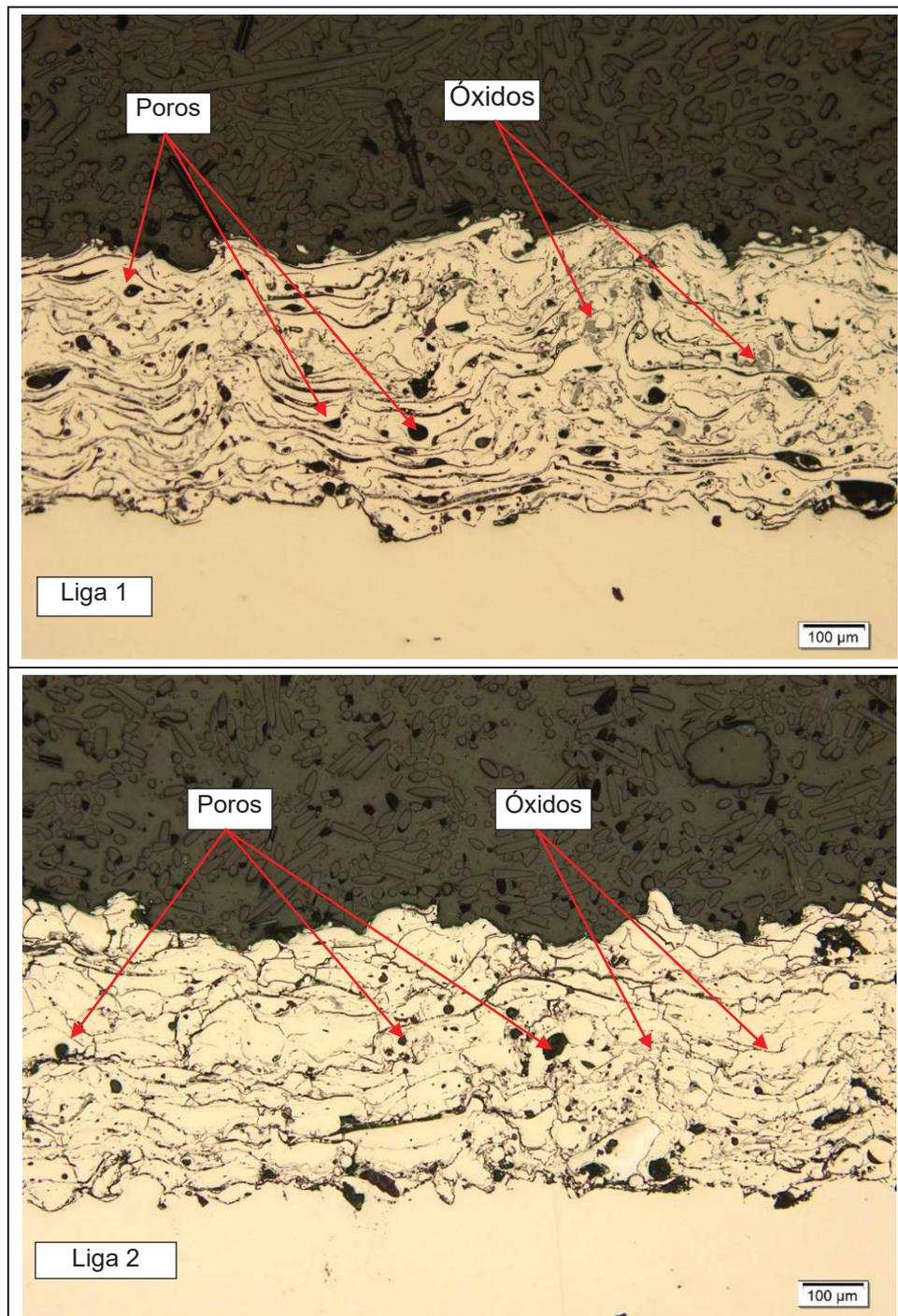
4.1.1 Morfologia dos Revestimentos – Estado Como Aspergido

A FIGURA 27 exibe as morfologias das seções transversais dos dois revestimentos avaliados, sem qualquer tratamento posterior à deposição, em ampliação de 100x, sendo a imagem superior referente à Liga 1 e a imagem inferior, à Liga 2. Os dois revestimentos apresentam morfologia comum ao processo de aplicação por arco elétrico (LIU et al., 2021 ; VAZ et al, 2021; YURY et al., 2018; SANTA, BAENA e TORO, 2007), onde se observa as lamelas achatadas do material metálico (fase clara), envoltas por filmes de óxidos e também com a presença de poros. As camadas depositadas de ambas as ligas apresentaram espessura na faixa de 350 a 400 μm .

Visualmente, o revestimento da Liga 2 se mostra ligeiramente mais denso, com poros menores e menos frequentes, entretanto, diferentemente da Liga 1, observa-se a presença de pequenas trincas, que crescem verticalmente atravessando as lamelas do revestimento. Na FIGURA 28, que exibe a morfologia das duas ligas em aumento de 200 X, tais trincas estão indicadas. Nos dois revestimentos percebe-se também a presença de partículas arredondadas, as quais podem ter sido apenas parcialmente fundidas durante o processo ou terem se

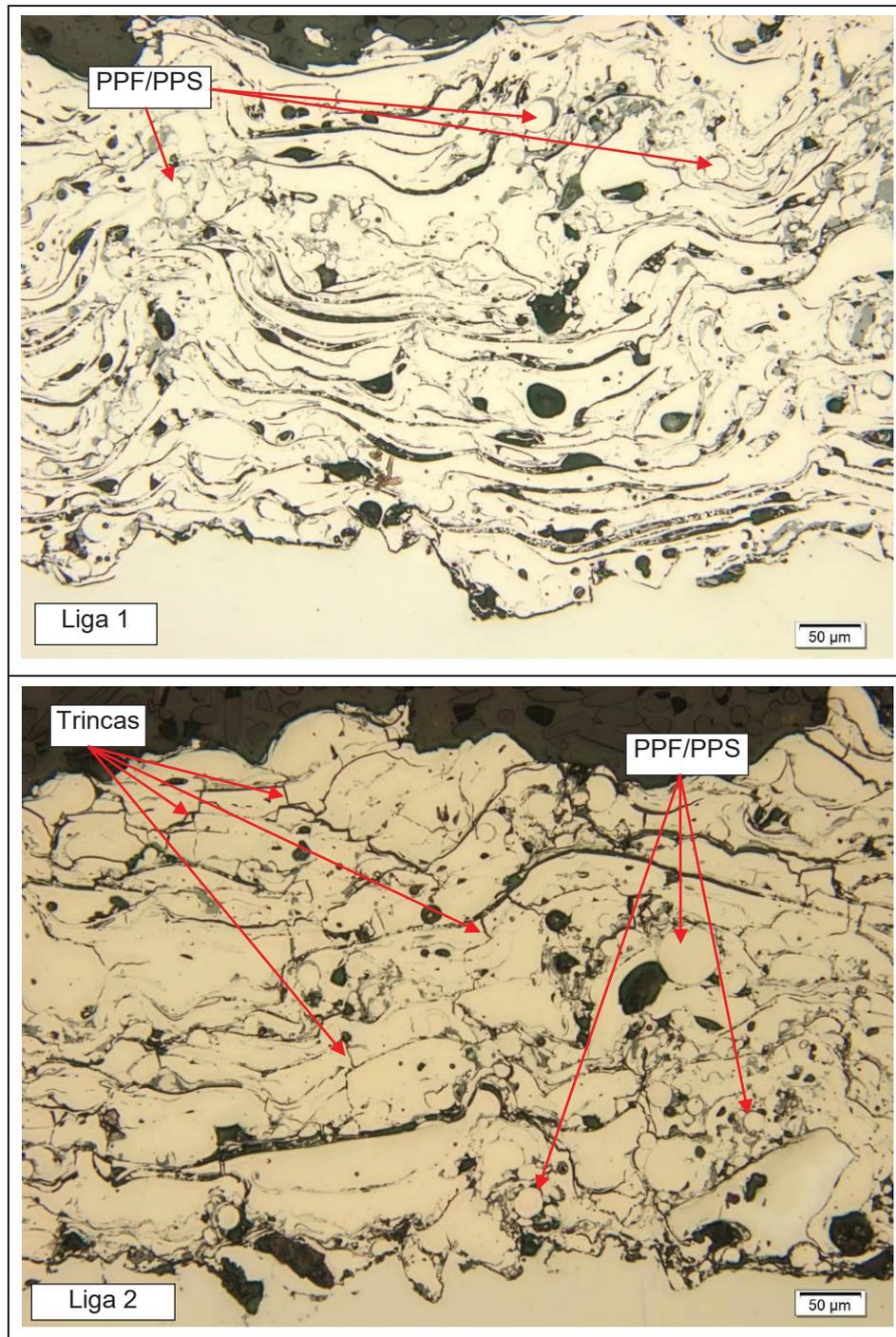
solidificado antes da chegada à superfície da amostra. Na FIGURA 28 essas partículas são identificadas como “PPF/PPS” (partícula parcialmente fundida / partícula previamente solidificada).

FIGURA 27: MORFOLOGIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS DOIS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. AMPLIAÇÃO 100X.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 28: MORFOLOGIA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO. AMPLIAÇÃO 200 X. DETALHES PARA PRESENÇA DE TRINCAS NO REVESTIMENTO DA LIGA 2.



FONTE: O autor (2021).

A TABELA 9 exibe os valores de poros e óxidos medidos a partir de análise de imagens das seções transversais dos revestimentos. Tais resultados são também expostos de maneira mais visual no GRÁFICO 1. Conforme já observado

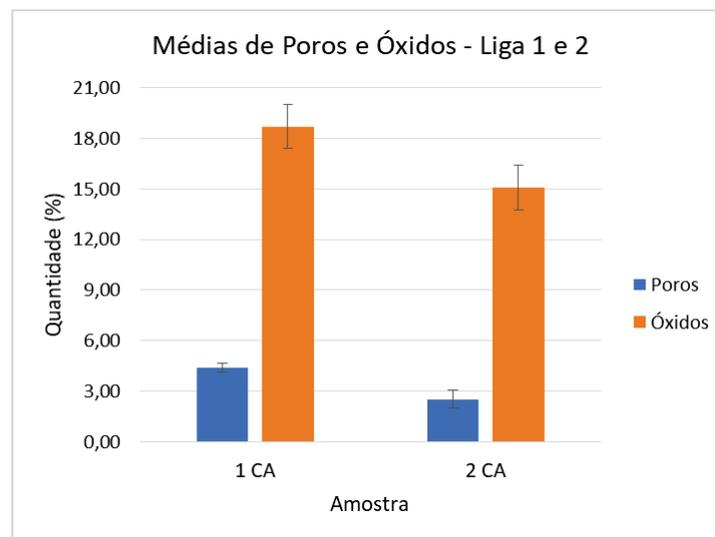
visualmente, o revestimento da Liga 2 apresentou menores valores de porosidade e oxidação.

TABELA 9: VALORES DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO NAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.

Revestimento	Medida	% Poros	% Óxidos
Liga 1	1	4,98	15,38
	2	3,88	24,21
	3	4,31	16,48
	Média	4,39	18,69
	Desvio padrão	0,45	3,93
Liga 2	1	1,60	14,78
	2	3,51	15,17
	3	2,44	15,29
	Média	2,52	15,08
	Desvio padrão	0,78	0,22

FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 1: NÍVEIS DE POROS E ÓXIDOS NOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

4.1.2 Dureza dos Revestimentos – Estado Como Aspergido

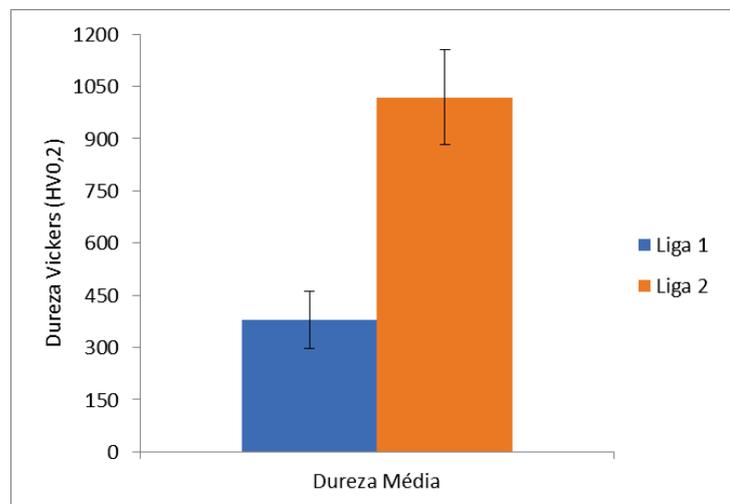
A TABELA 10 e o GRÁFICO 2 exibem os resultados das medidas de microdureza dos dois revestimentos como aspergidos. Fica claro a diferença considerável entre os níveis de dureza dos dois materiais, sendo a dureza média da Liga 2 mais de 2,5 vezes maior que a média da Liga 1. A variação dos resultados foi alta para ambas as ligas, porém, destacadamente maior na Liga 2, cujo desvio padrão foi de 136 HV.

TABELA 10: VALORES DE MICRODUREZA HV_{0,2} NOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.

Revestimento	Liga 1			Liga 2		
	A	B	C	A	B	C
Perfil						
Medida 1	291	309	495	963	951	1189
Medida 2	408	396	406	1003	1023	822
Medida 3	273	321	512	1105	849	1254
Média Geral	379			1018		
Desvio Padrão	82			136		

FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 2: DUREZA DOS REVESTIMENTOS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

Os altos valores de dureza para a Liga 2 são esperados em função dos níveis de carbono e cromo. As fases e constituintes metalúrgicos de casa material de revestimento não foram avaliadas, mas possivelmente as quantidades de tais elementos permitem a formação de carbonetos de cromo ao longo da camada. Isso também justificaria a flutuação dos valores de dureza, que depende a presença ou não dos carbonetos no ponto de medição. Nível de dureza semelhante foi alcançado por Lima et al. (2014), que obtiveram dureza de 948 HV para um revestimento da liga FeCrWCNb, fornecida em arame tubular de nanocomposito. Dureza média de 1100 HV foi obtida por Liu et al. (2021) em revestimento de base FeCr com adição de B, Si e Mn, também depositado por processo de aspersão térmica a arco elétrico. Neste caso o autor justifica a elevada dureza em função da formação de boretos na camada depositada.

4.1.3 Ensaio de Erosão por Jato de Lama - Estado Como Aspergido

O tempo total de ensaio de erosão por jato de lama foi de 4 minutos, sendo que a cada minuto as amostras eram avaliadas quanto à perda de massa. A TABELA 11 detalha os valores de perda de massa instantânea, para cada minuto de ensaio, para as duas ligas estudadas. A coluna “Min. 0” se refere à variação de massa gerada pelo tratamento superficial do revestimento. Neste caso, porém, por se tratar das amostras no estado como aspergido, esta variação inicial não existe. Para avaliar o desgaste total ao longo dos testes, a TABELA 12 expõe os valores de perda de massa acumulada, ou seja, a soma da variação instantânea com aquelas anteriores.

TABELA 11: PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA DAS AMOSTRAS COMO ASPERGIDAS.

Revestimento	Perda de massa instantânea (mg)				
	Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
Liga 1	0,0	26,4	12,8	14,5	9,4
Liga 2	0,0	33,2	16,5	17,0	5,9

FONTE: O autor (2021).

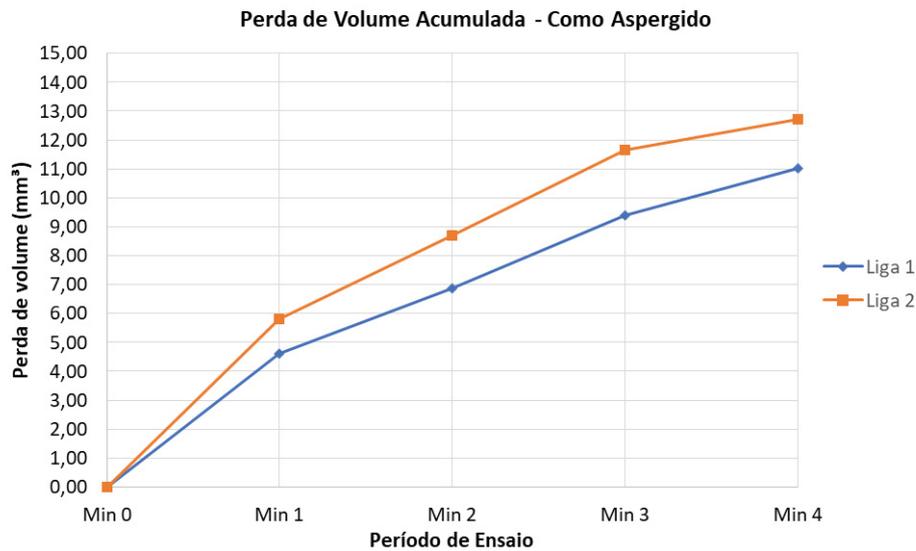
TABELA 12: PERDA DE MASSA ACUMULADA DAS AMOSTRAS COMO ASPERGIDAS.

Revestimento	Perda de massa acumulada (mg)				
	Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
Liga 1	0,0	26,4	39,2	53,7	63,1
Liga 2	0,0	33,2	49,7	66,7	72,6

FONTE: O autor (2021).

A partir dos valores de perda de massa acumulada e das densidades calculadas para cada revestimento (5,565 mg/mm³ para a Liga 1 e 5,717 mg/mm³ para a Liga 2), pode-se gerar o GRÁFICO 3, que ilustra o comportamento de perda de volume, em “mm³”, de cada revestimento, no estado como aspergido, ao longo dos ensaios de erosão por jato de lama. Observa-se que a Liga 2 apresentou maior desgaste em relação à Liga 1, estando as maiores diferenças ao longo dos dois minutos iniciais do ensaio.

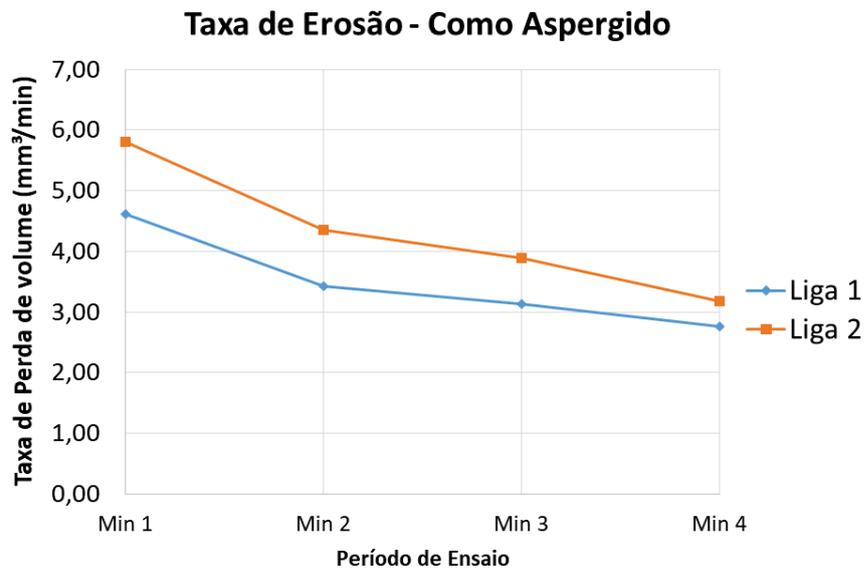
GRÁFICO 3: CURVA DE PERDA DE VOLUME ACUMULADA DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

O desgaste acentuado nos minutos iniciais do ensaio de erosão fica mais perceptível quando se observa o GRÁFICO 4, que apresenta a taxa de erosão, em “mm³/min”, para cada minuto de ensaio. Os valores deste gráfico foram obtidos a partir da divisão da perda de volume acumulada em um determinado instante, pelo tempo total decorrido (em minutos) até aquele momento. No gráfico fica claro o maior desgaste no primeiro minuto de ensaio. Ainda, percebe-se que a diferença de comportamento entre os dois revestimentos se mantem ao longo dos três minutos iniciais. No quarto minuto as taxas de desgaste nas duas ligas se tornam mais próximas.

GRÁFICO 4: CURVA DE TAXA DE EROÇÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO DAS AMOSTRAS NO ESTADO COMO ASPERGIDO.

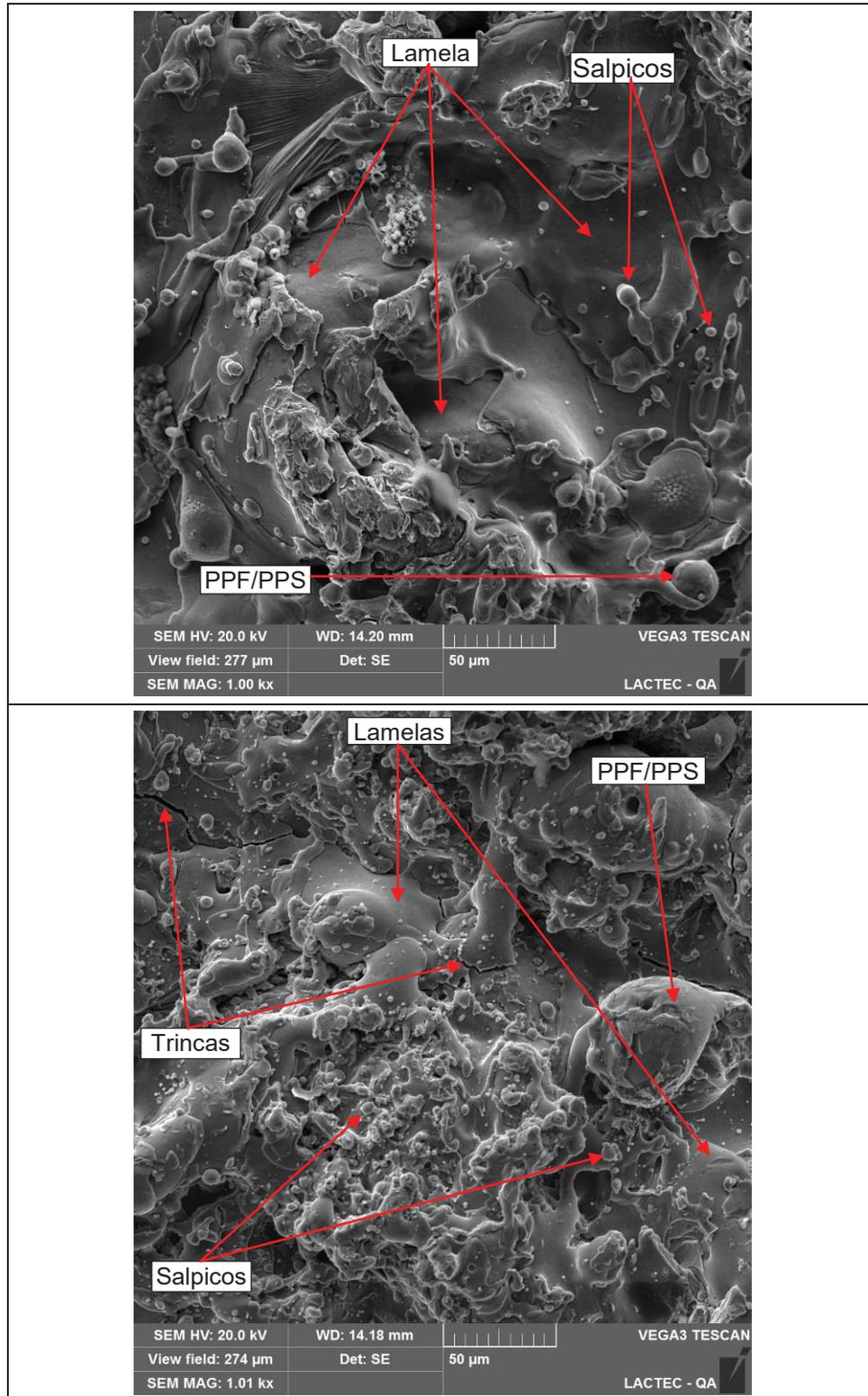


FONTE: O autor (2021).

Os resultados dos ensaios de erosão nos revestimentos como aspergidos mostram que, nas condições aplicadas aos testes, a maior dureza e menor quantidade de poros da Liga 2 não se refletiu em maior resistência ao desgaste. Este resultado é esperado se forem consideradas as informações da literatura que indicam maior taxa de desgaste em materiais frágeis quando o ângulo do jato erosivo é de 90° (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; JAVAHERI, PORTER e KUOKKALA, 2018). Além disso, a presença de trincas no revestimento da Liga 2 pode ter contribuído para o desprendimento de material durante a ação erosiva.

A FIGURA 29 exibe imagens obtidas em MEV das superfícies dos revestimentos das Ligas 1 e 2, no estado como aspergido, fora da área afetada pelo ensaio de erosão. Observam-se nas imagens as lamelas do revestimento (regiões lisas), além de salpicos (pequenas partículas esféricas) e PPF/PPS (partículas grandes esféricas), os quais se unem às lamelas através de áreas de contato muito pequenas. Desta forma, os salpicos e PPF/PPS são menos aderentes ao revestimento e, portanto, mais facilmente destacáveis da superfície durante o processo erosivo. Isso explica a maior taxa de erosão no primeiro minuto de ensaio, pois essas partículas ficam diretamente expostas ao fluxo abrasivo.

FIGURA 29: ASPECTO SUPERFICIAL DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 (SUPERIOR) E LIGA 2 (INFERIOR).



FONTE: O autor (2021).

Ainda na FIGURA 29, no revestimento da Liga 2, é possível verificar as trincas já identificadas nas análises da seção transversal. Além disso, comparando

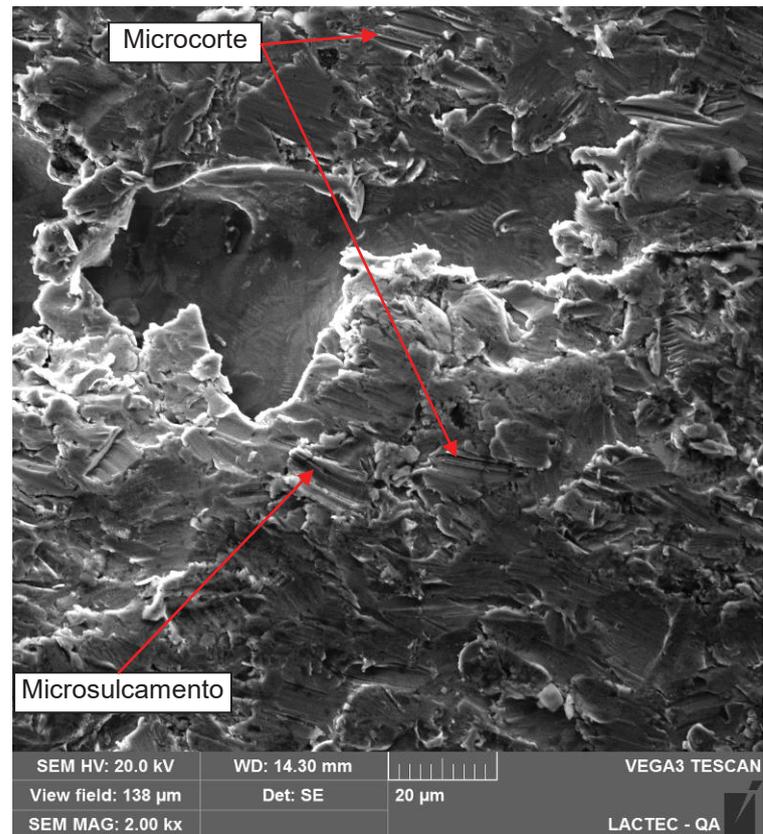
com o outro revestimento, este apresenta superfície mais heterogênea, em especial, com maior presença de salpicos. As trincas e os salpicos facilitaram o desprendimento de material durante o ensaio de erosão, gerando as maiores perdas de massa.

Grewal et al. (2013) também verificaram resultado semelhante em revestimentos de níquel com adição de alumina (Al_2O_3), aplicados por processo de chama de alta velocidade. Os autores verificaram maior resistência ao desgaste para liga com adição de 40% (em peso) de alumina. Para a condição com 70% de alumina e maior dureza, a taxa de desgaste foi mais acentuada. A justificativa dada neste caso foi uma melhor combinação de dureza e tenacidade à fratura, sendo esta última maior para a liga de 40% Al_2O_3 .

Após o segundo minuto de ensaio, as taxas de desgaste dos dois materiais foram mais semelhantes, porém a forma de remoção de material foi distinta entre os casos. A FIGURA 30 exibe a superfície do revestimento da Liga 1, após o término dos 4 minutos de ensaio de erosão. Verifica-se a presença de marcas de amassamento, microcorte e microsulcamento, além de uma região mais lisa e profunda, podendo ser um poro do revestimento ou local de desprendimento de uma lamela. Os três tipos de marcas citadas são comuns aos processos de desgaste, em especial quando se trata de materiais de maior ductilidade, sendo citadas por vários autores, como Javaheri, Porter e Kuokkala (2018), More, Bhatt e Menghani (2017), Grewal et al. (2013) e Santa, Baena e Toro (2007).

Na imagem, não se observa presença de trincas, nem tampouco regiões com aspecto de fratura frágil. Também, não se enxerga interfaces entre lamelas do revestimento.

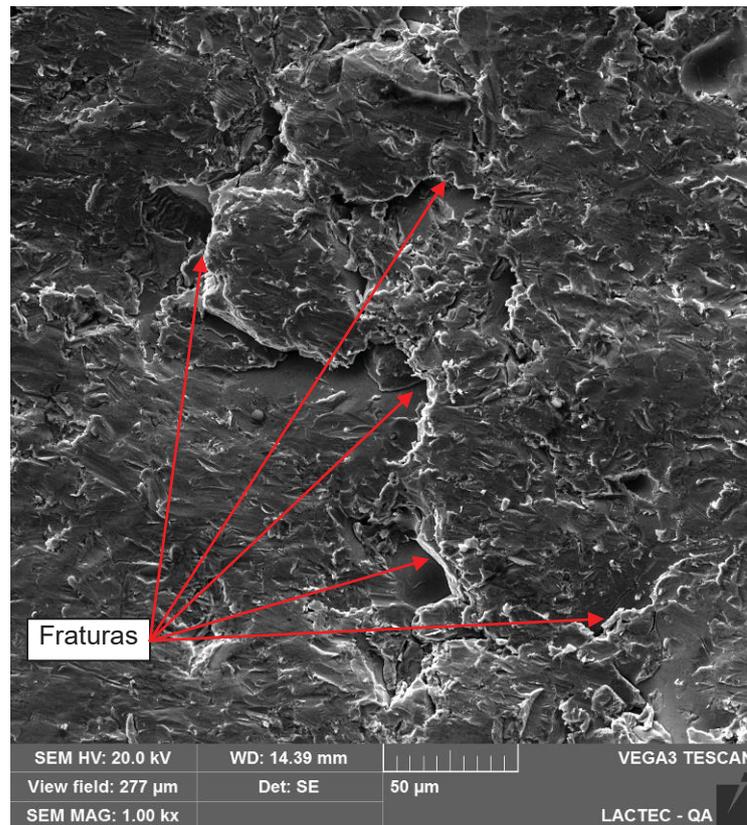
FIGURA 30: DETALHE DA REGIÃO DESGASTADA NA AMOSTRA 01 CA, APÓS 4 MINUTOS DE ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA.



FONTE: O autor (2021).

O aspecto microscópico da região desgastada na amostra 2 CA após os 4 minutos de ensaio é exposto na FIGURA 31. Nesta imagem também estão presentes marcas de microcorte e microsulcamento, porém, um pouco menos profundas e menos evidentes, em comparação com a amostra 1 CA. Por outro lado, observa-se com clareza regiões de fratura com aspecto frágil, em especial nas interfaces entre as lamelas do revestimento. Isso indica a ocorrência de um modo de desgaste mais comum em materiais duros e frágeis: o microtrincamento ou lascamento.

FIGURA 31: DETALHE DA REGIÃO DESGASTADA NA AMOSTRA 02 CA, APÓS 4 MINUTOS DE ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA.



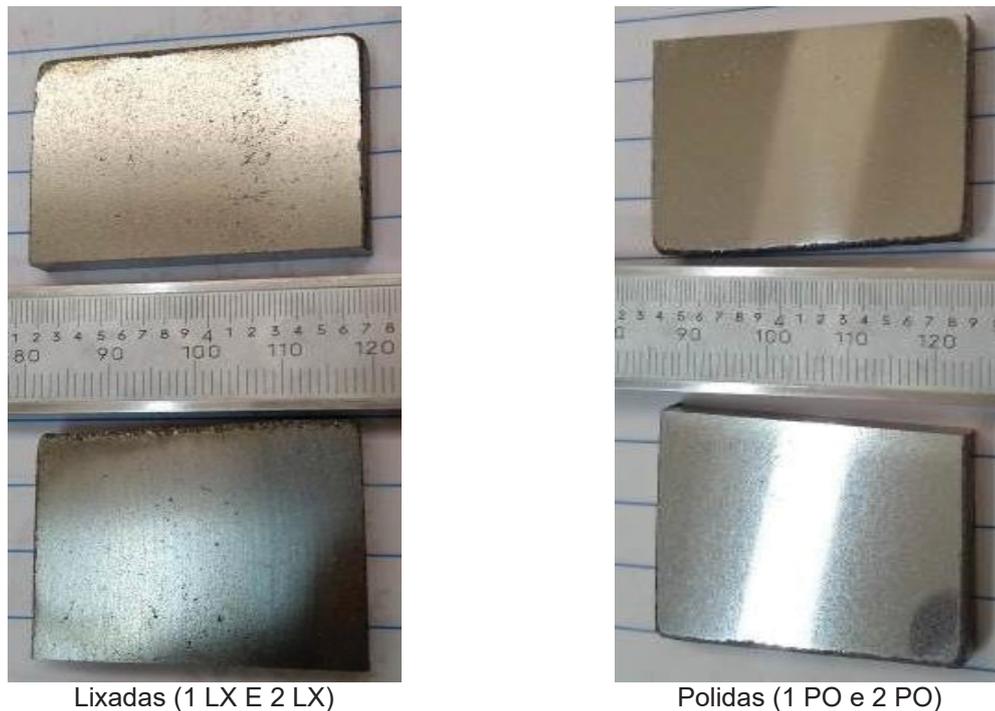
FONTE: O autor (2021).

Os mecanismos de desgaste, portanto, seguem o esperado para materiais brutos, tendo em vista a dureza significativamente superior da Liga 2. Entretanto, como a morfologia clássica dos revestimentos depositados por aspersão térmica a arco elétrico é dominada por interfaces (lamela – lamela, lamela – óxido, lamela – poro) e estas se mostraram preferencialmente atacadas pelo mecanismo de trincamento/lascamento, entende-se que tal fato tem influência direta nas maiores perdas de massa no revestimento de maior dureza. Ainda, adicionando-se as trincas formadas neste revestimento ainda durante a deposição, espera-se que o desgaste seja ainda mais acelerado.

4.2 RESULTADOS DAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS

A FIGURA 32 exhibe o aspecto das amostras dos revestimentos das Ligas 1 e 2, após tratamento superficial por lixamento em grão #120 (imagens à esquerda) e após polimento completo (imagens à direita).

FIGURA 32: AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 (PEÇAS SUPERIORES) E DA LIGA 2 (PEÇAS INFERIORES).



FONTE: O autor (2021).

Nessas amostras a rugosidade foi medida através de análise em perfilômetro ótico, sendo que os valores médios de Ra do revestimento da Liga 1 foram $0,561 \mu\text{m}$ e $0,158 \mu\text{m}$ para as condições lixada e polida, respectivamente. Para o revestimento da Liga 2, os valores médios de Ra foram $1,110 \mu\text{m}$ para a superfície lixada e $0,246 \mu\text{m}$ para a superfície polida.

Uma vez que os tratamentos de lixamento e polimento não interferem na morfologia dos revestimentos, não foram realizadas avaliações de dureza e morfologia nesses casos, sendo considerados iguais aos verificados nas amostras como aspergidas.

4.2.1 Ensaio de Erosão por Jato de Lama – Tratamentos por Lixamento e Polimento

A avaliação da resistência à erosão das amostras com tratamento superficial por lixamento e polimento foi realizada de duas formas:

Inicialmente, fez-se a análise das perdas de massa sem considerar o material que é perdido durante o próprio processo de desbaste do revestimento. O

objetivo aqui é avaliar puramente a influência do tipo de tratamento sobre o desgaste de cada liga.

Posteriormente, adicionaram-se às perdas de massa geradas no ensaio de erosão, aquelas perdas iniciais geradas durante os processos de lixamento e polimento. Neste caso o objetivo é comparar os níveis de desgaste gerados pelo tratamento superficial e pela erosão e, no caso de eventual melhora nas resistências ao desgaste nos revestimento tratados, se a redução na taxa de desgaste compensa o material perdido no tratamento.

Os valores de perda de massa isolada e acumulada ao longo dos ensaios de erosão são exibidos nas TABELA 13 e TABELA 14, respectivamente. Nessas tabelas ainda não é considerado o desgaste gerado pelo lixamento/polimento, portanto, no “minuto zero” a perda de massa das quatro amostras é zerada.

TABELA 13: VALORES DE PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.

Amostra	Perda de massa instantânea (mg)				
	Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
01 LX	0,0	13,4	9,0	8,9	6,1
01 PO	0,0	19,9	12,7	9,9	10,4
02 LX	0,0	16,0	15,4	13,6	13,2
02 PO	0,0	20,1	17,9	15,7	13,6

FONTE: O autor (2021).

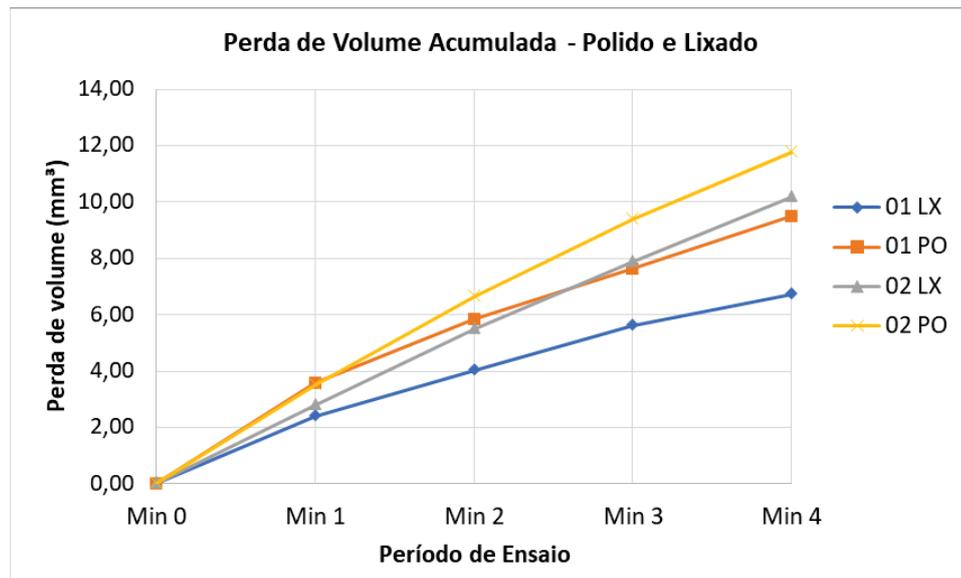
TABELA 14: VALORES DE PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.

Amostra	Perda de massa acumulada (mg)				
	Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
01 LX	0,0	13,4	22,4	31,3	37,4
01 PO	0,0	19,9	32,6	42,5	52,9
02 LX	0,0	16,0	31,4	45,0	58,2
02 PO	0,0	20,1	38,0	53,7	67,3

FONTE: O autor (2021).

O GRÁFICO 5 exhibe, a partir dos cálculos considerando as densidades dos revestimentos, as curvas de perda de volume acumulada para os quatro casos estudados neste tópico: Liga 1 e Liga 2 apenas lixadas e completamente polidas.

GRÁFICO 5: PERDA DE VOLUME ACUMULADA DAS AMOSTRAS APENAS LIXADAS E TOTALMENTE POLIDAS.



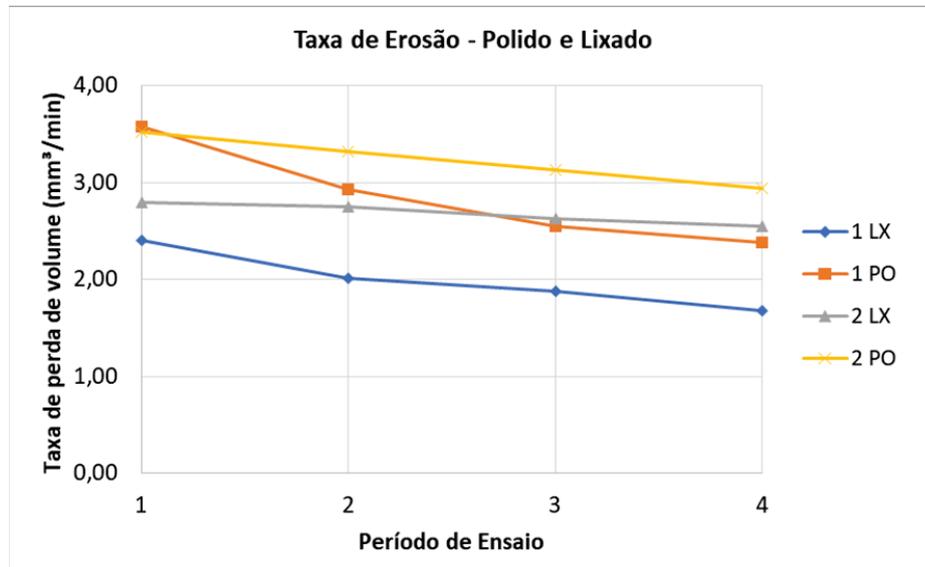
FONTE: O autor (2021).

Avaliando a perda de volume total no gráfico acima, observa-se novamente que a Liga 1 apresentou maior resistência, sendo que a superfície apenas lixada demonstrou comportamento melhor. Esta mesma forma de tratamento superficial também se mostrou mais resistente à erosão no caso da Liga 2.

Analisando as taxas de perda de volume por minuto de ensaio no GRÁFICO 6, nota-se maiores valores no minuto inicial, assim como ocorrera nos revestimentos como aspergido, porém em uma escala significativamente menor – 4,6 a 5,8 mm³/min no estado como aspergido e 2,4 a 3,6 mm³/min nos estados lixado e polido. Ainda se observa tendência de redução das taxas a partir do minuto inicial, porém em um nível muito menor. Isso, por um lado, confirma que a presença de partículas de baixa adesão, como salpicos e as PPF/PPS são responsáveis por uma maior taxa de desgaste no começo do processo erosivo. Entretanto, o fato de ainda ocorrer maiores taxas iniciais de erosão, em especial nas superfícies polidas, indica que outros fatores também podem estar relacionados a um maior desgaste nos primeiros minutos de ensaio. Neste sentido, recomenda-se estudos mais aprofundados no futuro, para certificar que não esteja ocorrendo aprisionamento, na superfície tratada, de partículas abrasivas provenientes do lixamento/polimento, as quais se soltariam logo no início do ensaio de erosão, e também para que se

realizem análises mais detalhadas da superfície erodida, a cada minuto de ensaio ou em períodos ainda mais curtos.

GRÁFICO 6: VARIAÇÃO DA TAXA DE EROÇÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO NAS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS.

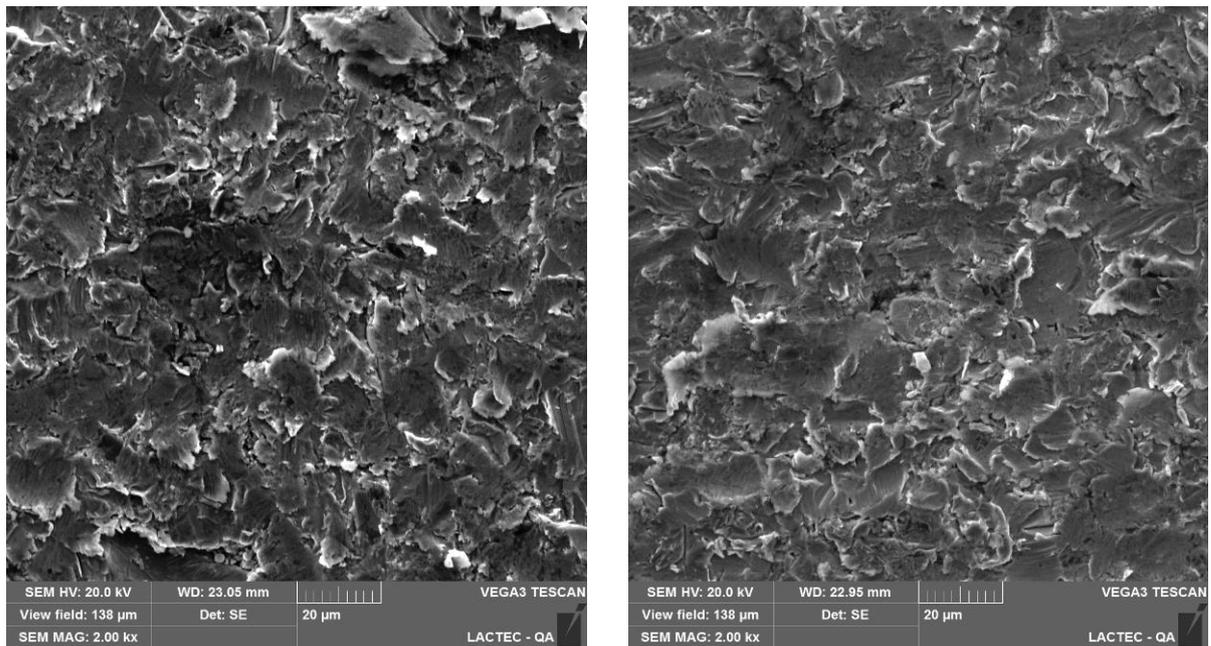


FONTE: O autor (2021).

A partir do primeiro minuto de ensaio, as taxas de erosão dos quatro casos caem para valores entre 2 e 3 mm³/min, próximos dos resultados referentes ao mesmo período de ensaio das amostras no estado como aspergido (GRÁFICO 4), indicando que os tratamentos superficiais por lixamento ou polimento geram melhora apenas momentânea na resistência ao desgaste, no início do processo erosivo. A medida que se perde o aspecto superficial obtido no tratamento, a taxa de desgaste tende a ser similar, independente do revestimento estar no estado como aspergido, lixado ou polido.

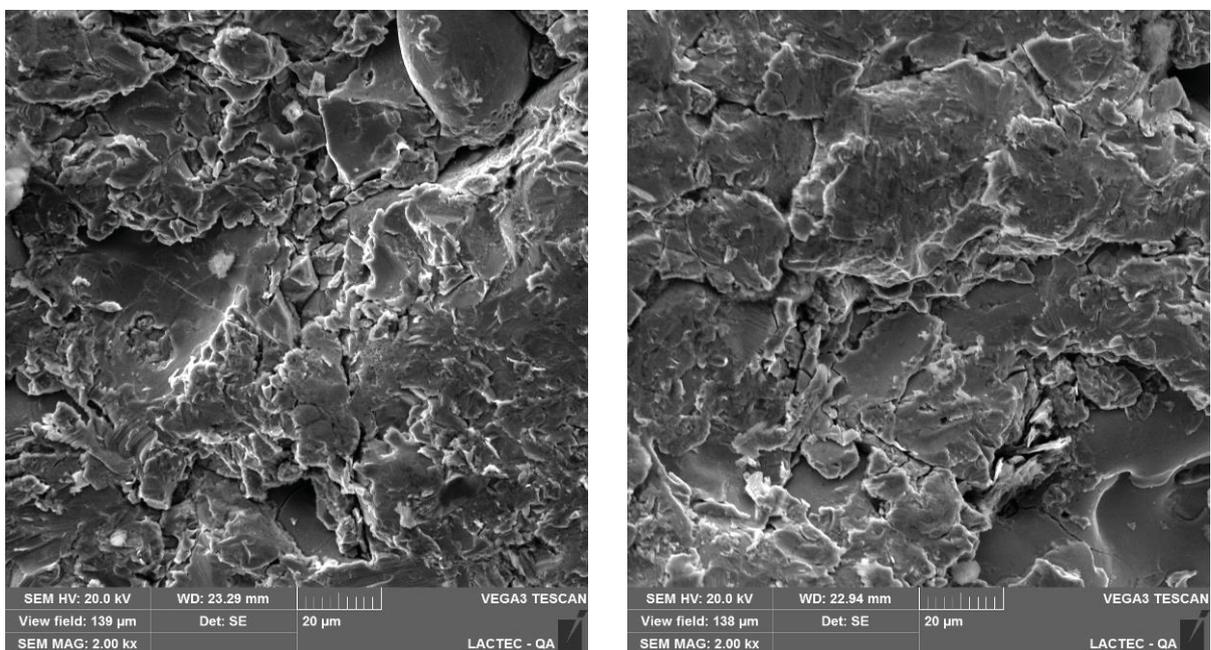
As análises das superfícies erodidas em MEV, após os 4 minutos de ensaio, reforçam que não há alteração no modo de desgaste após os instantes iniciais do ensaio. Nas FIGURA 33 e FIGURA 34 observam-se os mesmos aspectos já verificados nas superfícies ensaiadas dos revestimentos como aspergidos, com a Liga 1 apresentando maior deformação plástica e marcas de microcorte e microsulcamento e a Liga 2 com trincas e marcas de fratura frágil nas interfaces entre lamelas.

FIGURA 33: ASPECTO DAS SUPERFÍCIES ERODIDAS NAS AMOSTRAS 01 LX (ESQUERDA) E 01 PO (DIREITA).



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 34: ASPECTO DAS SUPERFÍCIES ERODIDAS NAS AMOSTRAS 02 LX (ESQUERDA) E 02 PO (DIREITA).



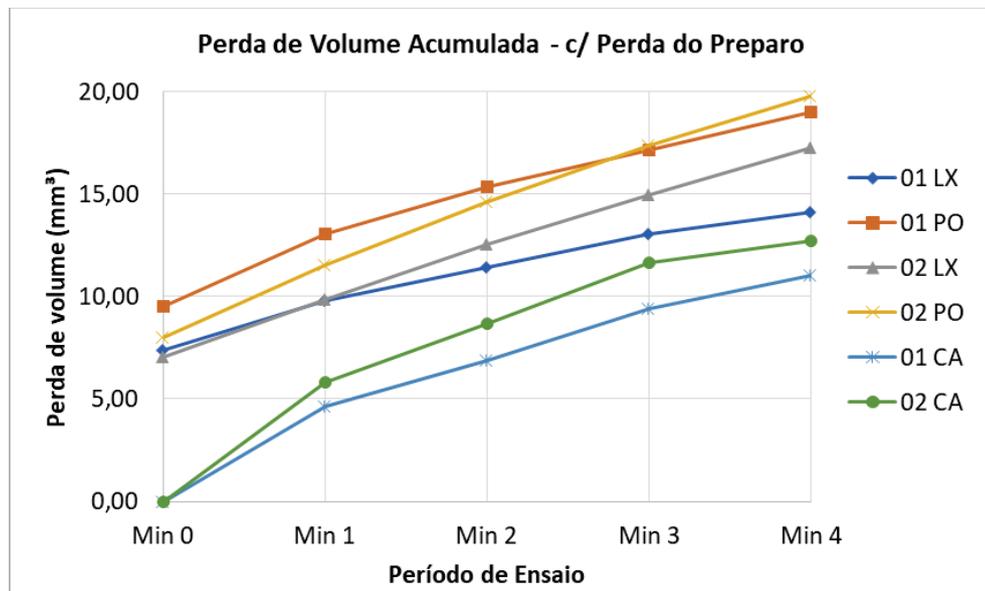
FONTE: O autor (2021).

A redução nas taxas iniciais de erosão em função do lixamento e polimento das superfícies dos revestimentos é interessante, entretanto, neste caso, deve-se

avaliar também o impacto gerado ao revestimento pelo próprio processo de tratamento, ou seja, a quantidade de material que se perde durante o simples lixamento ou polimento completo da superfície. Neste sentido, para os quatro casos detalhados neste tópico, devem ser consideradas as perdas de massa referente ao “minuto zero” de ensaio, conforme indicado na TABELA 7, do tópico 3.4.3.

O GRÁFICO 7 exibe novamente as curvas de perda de volume acumulada, porém agora considerando também a variação causada pelo próprio tratamento superficial, levando em conta, novamente, os valores de densidade dos revestimentos. Também, são inseridas no mesmo gráfico as curvas referentes aos dois revestimentos no estado como aspergido. Fica nítido que, apesar da redução do desgaste no primeiro minuto de ensaio (indicada pela diferença da inclinação das curvas entre os minutos 0 e 1), tanto o lixamento simples como o polimento completo acarretam numa perda de volume inicial, em função do próprio processo, muito elevada. Assim, considerando o desgaste no tempo total de ensaio de 4 minutos, os tratamentos de lixamento e polimento não são vantajosos.

GRÁFICO 7: PERDA DE VOLUME ACUMULADA NOS REVESTIMENTOS LIXADOS E POLIDOS CONSIDERANDO PERDA PELO TRATAMENTO SUPERFICIAL E COMPARAÇÃO COM REVESTIMENTOS COMO ASPERGIDOS.



FONTE: O autor (2021).

4.3 RESULTADOS DAS AMOSTRAS COM *SHOT PEENING*

O processo de *shot peening*, diferentemente dos tratamentos de lixamento e polimento, pode alterar outras características do revestimento além do aspecto superficial, tais como dureza e porosidade (SUCHARSKI et al., 2015). Desta forma, as análises das amostras que passaram por tal tratamento foram realizadas de forma semelhante às aquelas executadas nos revestimentos em estado como aspergido.

Inicialmente foram avaliadas as morfologias das seções transversais das camadas jateadas, realizando-se contagem de óxidos e poros e medindo a dureza das camadas. Os resultados dessas análises, em comparação com os dados coletados dos revestimentos como aspergidos, servem para avaliar se o *shot peening* gera alterações nos revestimentos que possam vir a influenciar na resistência à erosão.

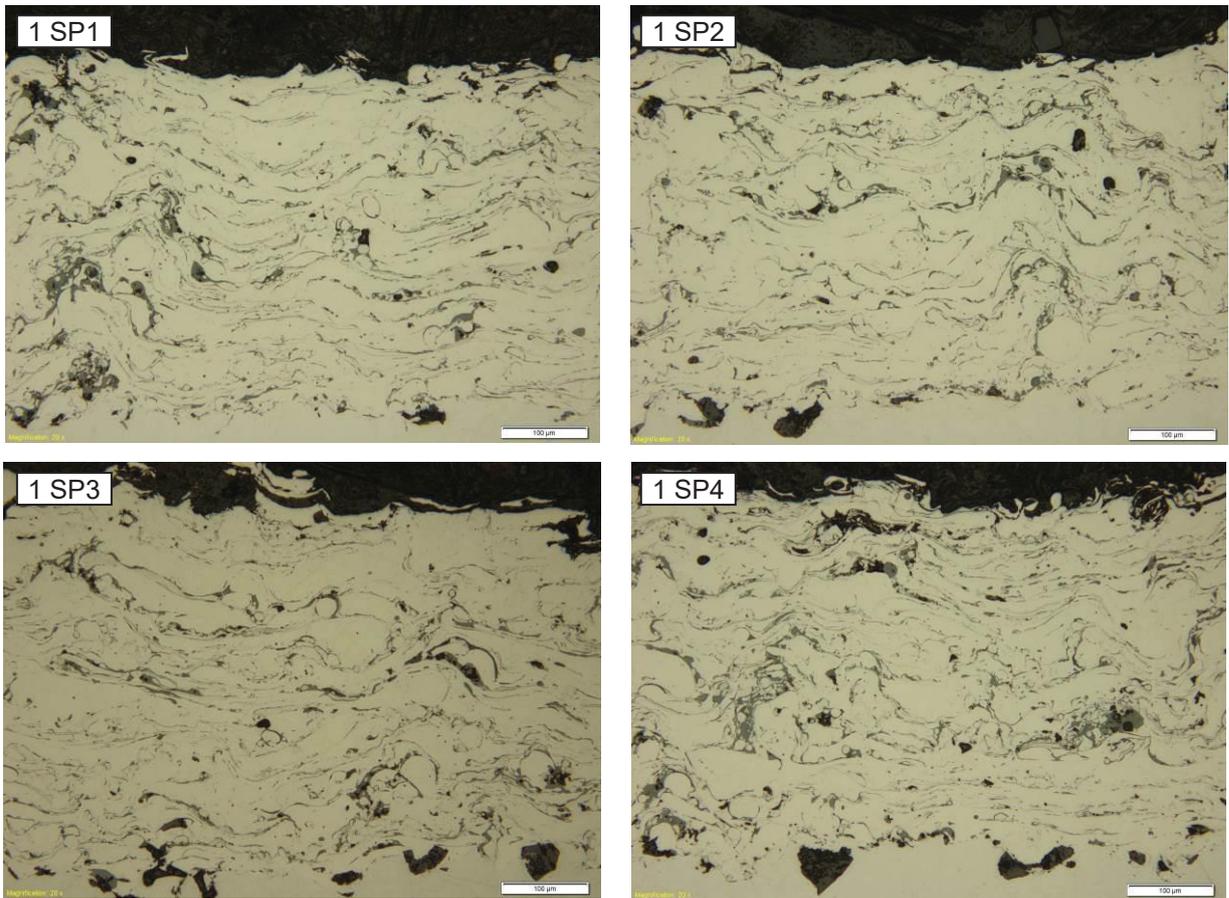
Num segundo momento são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de erosão por jato de lama, buscando correlacionar os desempenhos com as eventuais alterações de morfologia da seção transversal. Em paralelo, são analisados também, através de imagens obtidas em MEV, os aspectos das superfícies jateadas e as alterações em relação às superfícies originais dos revestimentos.

Por fim, com o intuito de avaliar as influências dos parâmetros do processo de *shot peening* sobre as propriedades dos revestimentos e resistência à erosão, é feita a análise estatística pelo planejamento Taguchi, considerando a matriz de experimentos da TABELA 5.

4.3.1 Análise de Morfologia dos Revestimentos Tratados com *Shot Peening*

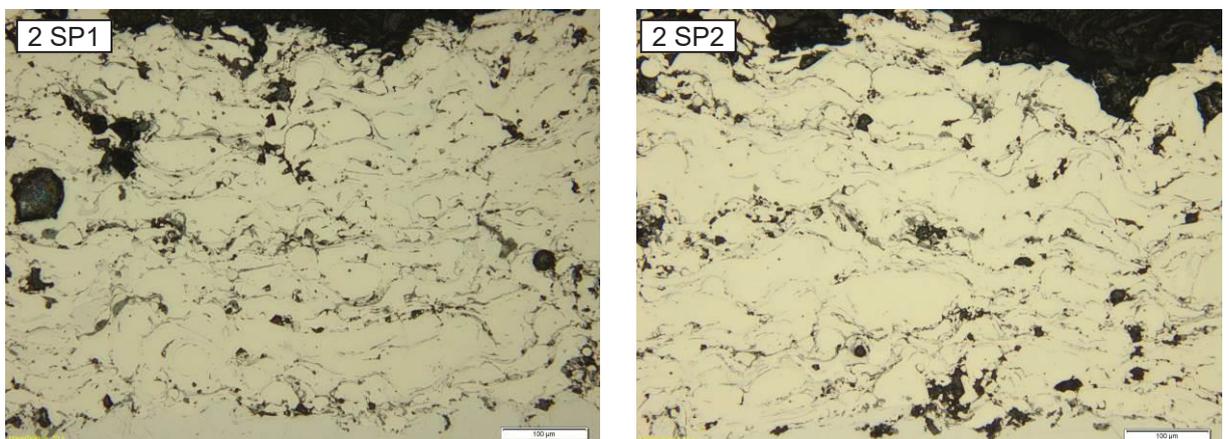
Referente à Liga 1, as morfologias das amostras tratadas com *shot peening*, em aumento de 200 X, podem ser observadas na FIGURA 35. A FIGURA 36 exhibe as morfologias dos revestimentos da Liga 2, também após os tratamentos com as mesmas configurações de parâmetros e na mesma ampliação.

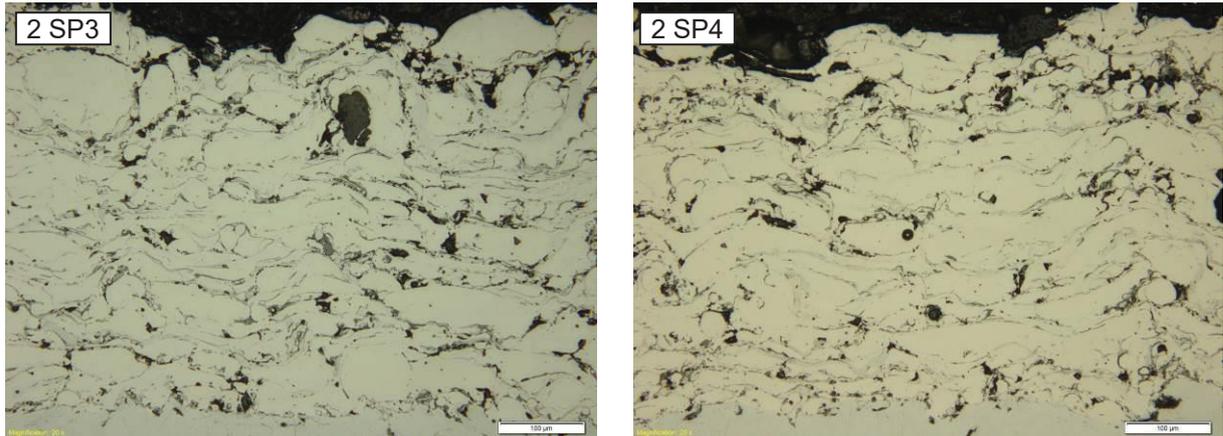
FIGURA 35: MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS APLICAÇÃO DE *SHOT PEENING* COM DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (VALOR DAS ESCALAS – 100 μm). AMPLIAÇÃO 200 X.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 36: MORFOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS APLICAÇÃO DE *SHOT PEENING* COM DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (VALOR DAS ESCALAS – 100 μm). AMPLIAÇÃO 200 X.





FONTE: O autor (2021).

Observando as imagens das amostras da Liga 1, percebe-se, quando comparadas com a morfologia da mesma liga no estado como aspergido (FIGURA 28) que aparentemente houve sensível densificação das camadas. Para os revestimentos da Liga 2, entretanto, tal alteração não é perceptível. Esses comportamentos são comprovados quando se analisam os resultados de teor de poros e óxidos, os quais são exibidos na TABELA 15, que traz também, novamente, para comparação, os valores obtidos para as amostras no estado como aspergido. Os números indicam redução na porosidade dos revestimentos da Liga 1 que passaram por *shot peening*. Na liga 2 não ocorreu o mesmo fenômeno, com valores de porosidade variando inclusive para níveis acima daquele no estado como aspergido, aparentemente, sem relação com o tratamento superficial realizado. Os GRÁFICO 8 e GRÁFICO 9 ilustram os comportamentos para cada liga, onde as barras indicam as médias de poros e óxidos para cada amostra, acompanhadas pelas indicações de desvio padrão.

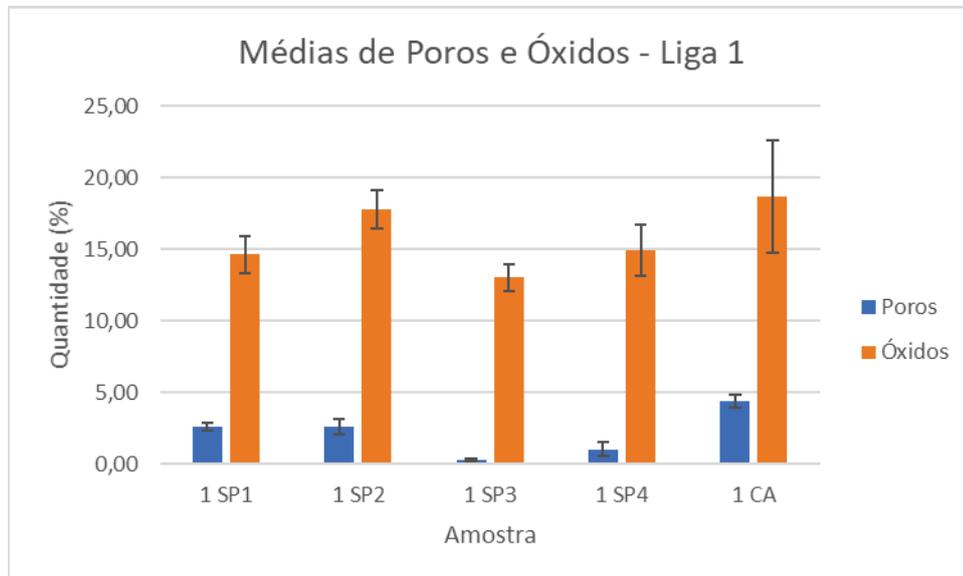
TABELA 15: RESULTADOS DOS TEORES DE POROS E ÓXIDOS DOS REVESTIMENTOS APÓS SHOT PEENING E NO ESTADO COMO ASPERGIDO.

Amostra	Medida	1	2	2	Média	Desv. Padrão
1 SP1	Poros	2,89	2,75	2,28	2,64	0,26
	Óxidos	15,79	12,86	15,34	14,66	1,29
1 SP2	Poros	1,89	2,89	3,13	2,64	0,54
	Óxidos	15,94	18,64	18,91	17,83	1,34
1 SP3	Poros	0,30	0,39	0,26	0,32	0,05
	Óxidos	14,32	12,17	12,63	13,04	0,92
1 SP4	Poros	1,74	0,52	0,90	1,05	0,51
	Óxidos	16,84	12,61	15,40	14,95	1,76
1 CA	Poros	4,98	3,88	4,31	4,39	0,45

Amostra	Medida	1	2	2	Média	Desv. Padrão
	Óxidos	15,38	24,21	16,48	18,69	3,93
2 SP1	Poros	1,48	1,02	2,25	1,58	0,51
	Óxidos	12,95	15,20	17,09	15,08	1,69
2 SP2	Poros	3,38	4,81	4,65	4,28	0,64
	Óxidos	13,33	15,20	80,84	16,46	3,19
2 SP3	Poros	3,05	3,55	4,68	3,76	0,68
	Óxidos	10,83	17,41	16,69	14,98	2,95
2 SP4	Poros	2,81	1,88	3,03	2,57	0,50
	Óxidos	14,54	14,89	16,95	15,46	1,06
2 CA	Poros	1,60	3,51	2,44	2,52	0,78
	Óxidos	14,78	15,17	15,29	15,08	0,22

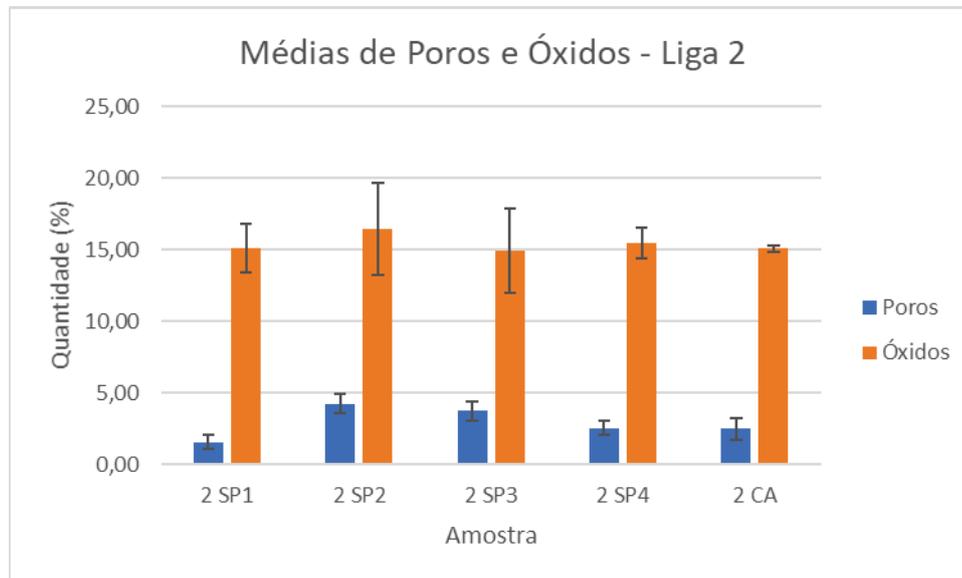
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 8: VARIAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS *SHOT PEENING* E COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 9: VARIAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE E OXIDAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS SHOT PEENING E COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

4.3.2 Durezas dos Revestimentos Tratados com *Shot Peening*

As TABELA 16 e TABELA 17 exibem os valores obtidos das medições de microdureza realizados nas seções transversais dos revestimentos tratados com *shot peening*, referente às Ligas 1 e 2, respectivamente. A distribuição das identificações se deu da mesma forma já ilustrada na FIGURA 24, porém, neste caso, com dez perfis de três medidas em cada amostra, visando ter uma melhor avaliação de possíveis alterações de dureza. O objetivo aqui foi verificar se o *shot peening*, realizado com diferentes parâmetros de processo, foi capaz de gerar alterações de dureza ao longo da espessura dos revestimentos. Portanto, as médias e desvios padrão foram calculados em relação à posição da medição em relação à espessura do revestimento, ou seja, referentes às posições “Superior”, “Central” e “Inferior”. Ainda, para cada posição, das dez medidas, foram desconsiderados o maior e o menor valor, sendo então considerados os demais oito pontos de cada linha. Para fins de comparação, na mesma tabela são colocados novamente os valores relativos aos revestimentos no estado como aspergido (CA), no qual a média foi calculada em relação ao total de identificações.

TABELA 16: VALORES DE DUREZA (HV0,2) NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS COM SHOT PEENING.

Amostra	Posição	Liga 1								Média	Desv. Padrão	
		A	B	C	D	E	F	G	H			
1 SP1	Superior	368	296	360	282	316	318	222	303	308	46	
	Central	261	276	373	234	310	363	430	360			326
	Inferior	277	311	392	362	295	452	303	330			340
1 SP2	Superior	430	390	294	417	306	350	452	476	389	67	
	Central	436	373	474	357	362	346	352	384			386
	Inferior	421	355	371	322	329	384	335	371			361
1 SP3	Superior	440	419	376	267	301	401	221	402	353	80	
	Central	382	396	376	302	409	328	310	368			359
	Inferior	428	347	316	330	325	374	363	325			351
1 SP4	Superior	346	436	327	417	410	321	347	450	382	52	
	Central	339	283	343	322	397	399	410	452			368
	Inferior	465	254	417	219	373	305	270	273			322
1 CA	Superior	291	309	495	-	-	-	-	-	379	82	
	Central	408	396	406	-	-	-	-	-			
	Inferior	273	321	512	-	-	-	-	-			

FONTE: O autor (2021).

TABELA 17: VALORES DE DUREZA (HV0,2) NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 TRATADOS COM SHOT PEENING.

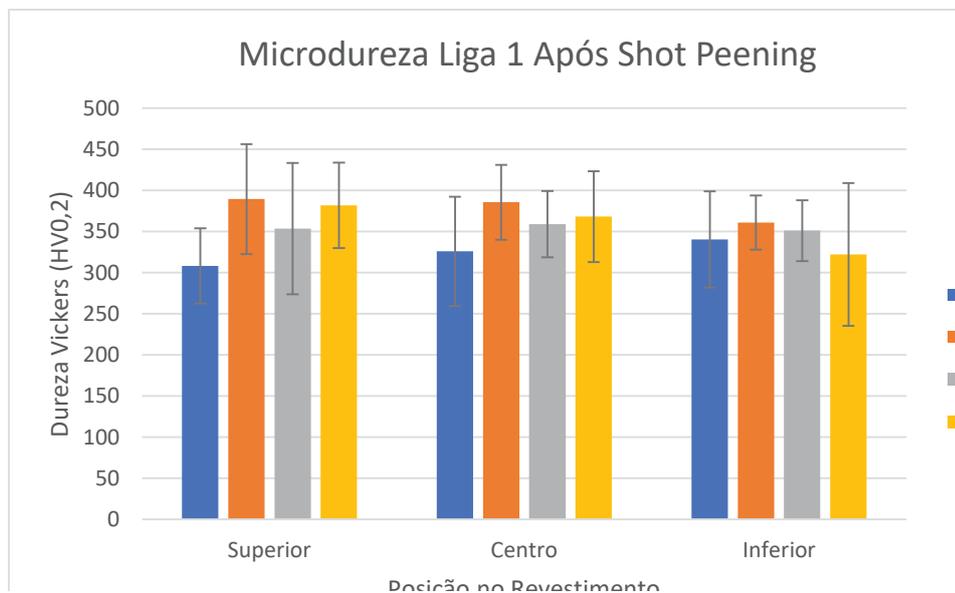
Amostra	Posição	Liga 2								Média	Desv. Padrão	
		A	B	C	D	E	F	G	H			
2 SP1	Superior	894	888	1207	860	1074	882	1080	974	995	141	
	Central	1113	1274	968	1022	658	1163	981	1172			1044
	Inferior	1294	1015	974	994	988	955	1008	974			1025
2 SP2	Superior	1015	1189	712	1146	981	1254	988	1105	1049	168	
	Central	1207	1274	1198	924	1254	994	1001	1081			1117
	Inferior	1217	1294	808	1089	1245	838	798	818			1013
2 SP3	Superior	1015	1113	1163	930	888	1074	1001	961	1018	94	
	Central	1264	1051	1081	1226	1226	1245	1154	981			1154
	Inferior	1207	1121	930	905	1081	1015	1198	1235			1087
2 SP4	Superior	924	1029	1284	1015	1294	818	1008	1264	1080	180	
	Central	1022	1001	844	1154	1029	1059	871	1226			1026
	Inferior	1346	894	1189	1284	1089	1008	1138	1146			1137
2 CA	Superior	623	840	1163	-	-	-	-	-	926	259	
	Central	828	631	783	-	-	-	-	-			
	Inferior	1182	849	1436	-	-	-	-	-			

FONTE: O autor (2021).

Para facilitar a análise dos resultados de dureza, os valores médios das tabelas acima, assim como seus respectivos desvios padrões, são plotados nos GRÁFICO 10 e GRÁFICO 11, referentes à Liga 1 e à Liga 2, respectivamente. Em relação à Liga 1, observa-se, em especial nas amostras 1 SP1 e 1 SP4 alguma variação na dureza média entre a superfície e a base do revestimento. Entretanto,

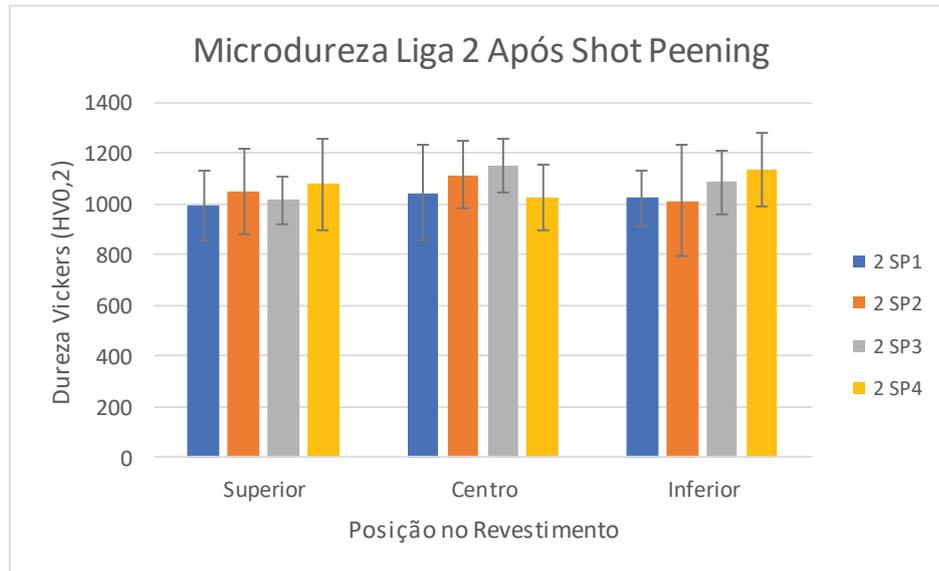
em todos os casos, a variação na média não é significativa perante os desvios padrões apresentados. As variações dos valores de dureza das quatro amostras tratadas estão ligadas à própria heterogeneidade dos depósitos, não sendo possível atribuir alterações causadas pelo *shot peening*. O mesmo comportamento é observado na Liga 2, com valores altos de desvio padrão que não permitem identificar alterações entre os valores de dureza ao longo das espessuras dos revestimentos. Desta forma, não se pode afirmar que o processo de *shot peening* tenha gerado encruamento em nível significativo em qualquer das duas ligas, independentemente dos parâmetros de processo adotados.

GRÁFICO 10: MICRODUREZA HV0,2 NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 APÓS SHOT PEENING EM COMPARAÇÃO COM O ESTADO COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 11: MICRODUREZA HV0,2 NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 APÓS SHOT PEENING EM COMPARAÇÃO COM O ESTADO COMO ASPERGIDO.



FONTE: O autor (2021).

4.3.3 Ensaio de Erosão por Jato de Lama – Tratamento por *Shot Peening*

Os resultados de perda de massa instantânea e acumulada obtidos dos ensaios nas amostras tratadas com *shot peening*, para ambas as ligas, são dados nas TABELA 18 e TABELA 19. Neste momento, para que se analise puramente a influência do tratamento na resistência ao desgaste, desconsidera-se a perda de massa gerada durante o próprio jateamento. Portanto, os valores referentes ao “minuto zero” são zerados.

TABELA 18: VALORES DE PERDA DE MASSA INSTANTÂNEA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS TRATADAS COM *SHOT PEENING*.

Revestimento	Amostra	Perda de massa instantânea (mg)				
		Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
Liga 1	01 SP1	0,0	20,8	15,3	11,1	12,8
	01 SP2	0,0	20,0	16,4	10,5	11,6
	01 SP3	0,0	22,1	15,0	11,8	11,3
	01 SP4	0,0	25,0	15,2	9,5	7,1
Liga 2	02 SP1	0,0	25,5	21,9	16,7	15,8
	02 SP2	0,0	33,4	24,5	15,6	17,7
	02 SP3	0,0	32,5	22,7	15,6	18
	02 SP4	0,0	34,8	21,0	16,6	18,7

FONTE: O autor (2021).

TABELA 19: VALORES DE PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROSÃO NAS AMOSTRAS TRATADAS COM *SHOT PEENING*.

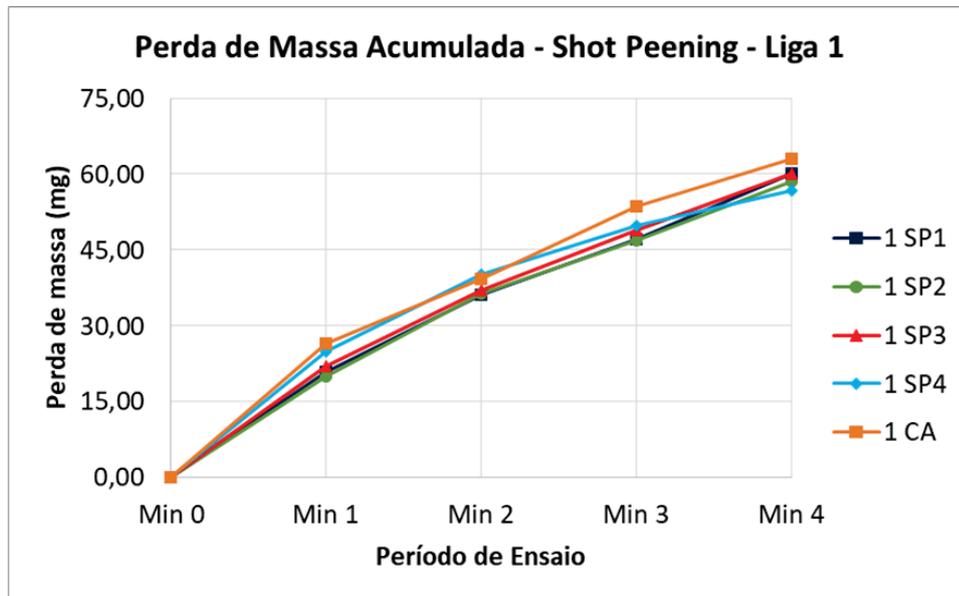
Revestimento	Amostra	Perda de massa acumulada (mg)				
		Min. 0	Min. 1	Min. 2	Min. 3	Min. 4
Liga 1	01 SP1	0,0	20,8	36,1	47,2	60,0
	01 SP2	0,0	20,0	36,4	46,9	58,5
	01 SP3	0,0	22,1	37,1	48,9	60,2
	01 SP4	0,0	25,0	40,2	49,7	56,8
Liga 2	02 SP1	0,0	25,5	47,4	64,1	79,9
	02 SP2	0,0	33,4	57,9	73,5	91,2
	02 SP3	0,0	32,5	55,2	70,8	88,8
	02 SP4	0,0	34,8	55,8	72,4	91,1

FONTE: O autor (2021).

O GRÁFICO 12 exibe as curvas de perda de massa acumulada referentes aos ensaios de erosão nos revestimentos da Liga 1 tratado pelo processo de *shot peening* em quatro diferentes combinações de parâmetros. Conforme citado anteriormente, aqui não é considerado o desgaste de material causado pelo próprio tratamento aplicado, portanto, a perda de massa no “minuto zero” é zero. No mesmo gráfico, para fim de comparação, está também inserida a curva referente ao revestimento da Liga 1 no estado como aspergido (1 CA). Ainda, nesse caso e nos demais referentes às amostras com *shot peening*, como as comparações são feitas entre diferentes condições do pós-tratamento sobre um mesmo tipo de revestimento (Liga 1 ou Liga 2), utilizam-se nos gráficos os próprios valores de perda de massa (em “mg”), sem conversão para valores de volume.

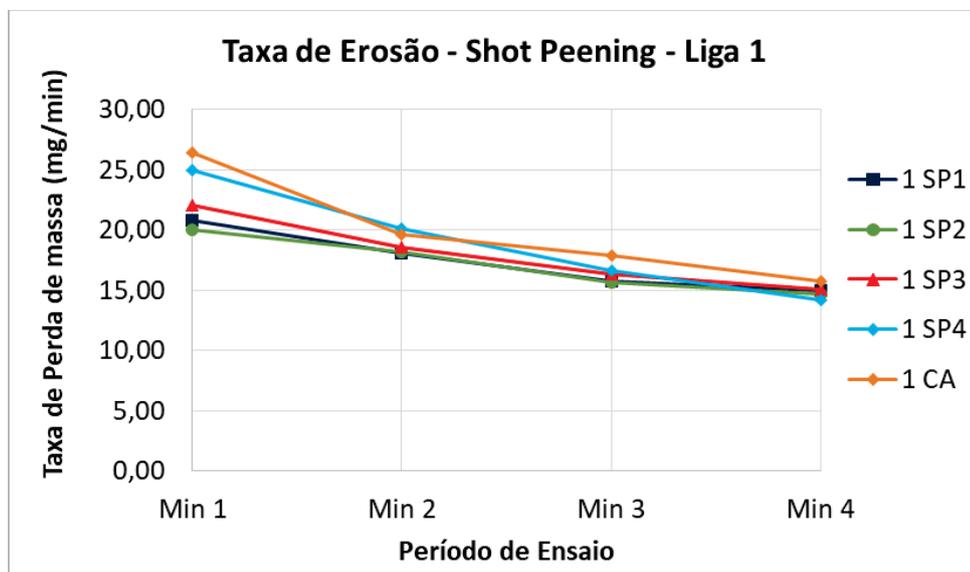
Percebe-se que, no caso da Liga 1, a aplicação de *shot peening*, independente dos parâmetros de processo utilizados, não gerou alteração significativa na resistência ao desgaste erosivo do revestimento, apesar de uma pequena redução na perda de massa total. Avaliando as curvas de taxa de desgaste, GRÁFICO 13, pode-se observar que os revestimentos tratados tiveram, no minuto inicial do ensaio, taxas ligeiramente menores em relação ao material no estado como aspergido, sendo a maior diferença em relação à amostra 1 SP2, cuja taxa foi 7,0 mg/min mais baixa que aquela do revestimento como aspergido. Nos minutos seguintes, entretanto, os valores foram todos muito próximos para todos os casos, inclusive aquele como aspergido.

GRÁFICO 12: PERDA DE MASSA ACUMULADO DURANTE OS ENSAIOS DE EROSIÃO NOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS POR *SHOT PEENING*.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 13: TAXA DE EROSIÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 1 TRATADOS POR *SHOT PEENING*.

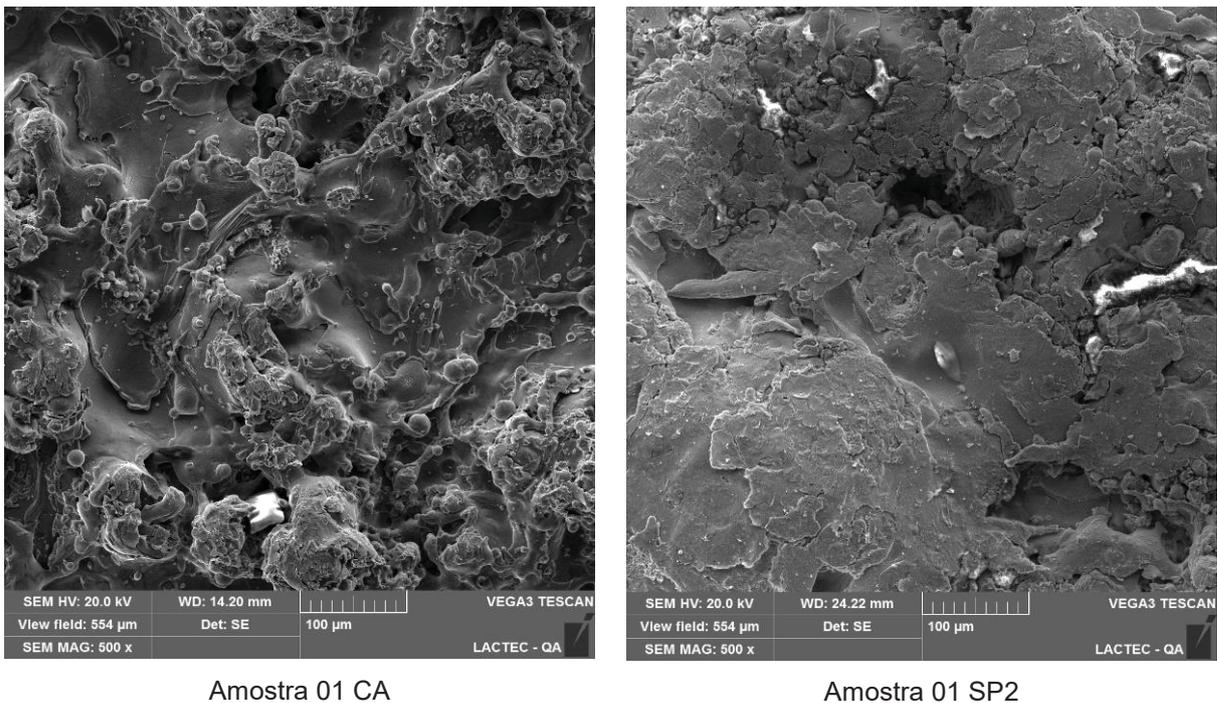


FONTE: O autor (2021).

A pequena melhora na taxa de desgaste inicial pode estar atrelada ao fato de que o *shot peening* remove parte das partículas de menor aderência presentes na superfície do revestimento, ou as deforma plasticamente, compactando-as junto à superfície do material e elevando sua adesão. Este fenômeno pode ser visualizado na FIGURA 37, que compara uma imagem da superfície do revestimento como

aspergido da Liga 1 com o mesmo revestimento após a execução do *shot peening* (amostra 1 SP2). Na imagem à direita, nota-se a deformação plástica dos picos do revestimento, gerando uma superfície mais lisa e com menos salpicos.

FIGURA 37: COMPARAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO DA LIGA 1 NO ESTADO COMO ASPERGIDO (À ESQUERDA) E APÓS TRATAMENTO POR *SHOT PEENING* (À DIREITA).

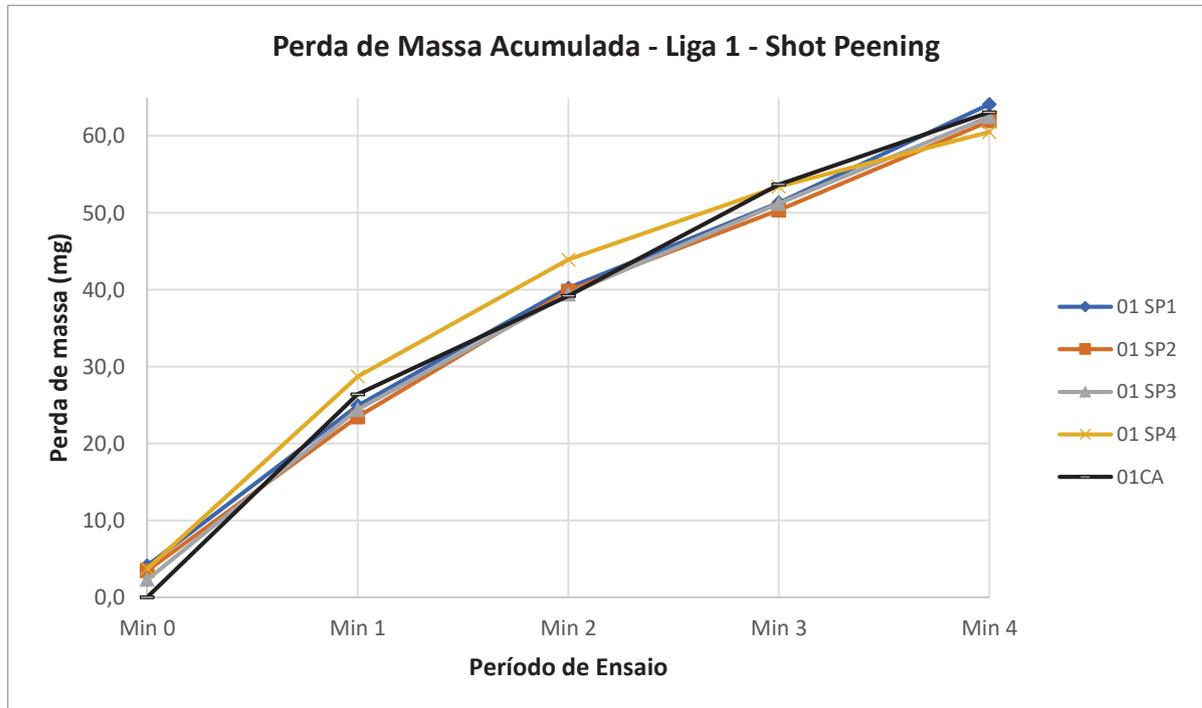


FONTE: O autor (2021).

Para uma avaliação mais completa, nos casos dos revestimentos tratados com *shot peening* deve-se também considerar a ocorrência de uma eventual perda de massa ocorrida durante o próprio processo de jateamento com esferas. Para isso, devem-se considerar os valores de perda de massa informados na TABELA 8 do tópico 3.4.3.

O GRÁFICO 14 exhibe novamente as curvas de perda de massa acumulada para as amostras da Liga 1 tratadas com *shot peening*, agora considerando o desgaste no “minuto zero”, gerado em função do próprio tratamento. Diferentemente das amostras lixadas e polidas, o desgaste inicial aqui é muito reduzido, ficando abaixo de 5,0 mg para os revestimentos da Liga 1. Entretanto, essa pequena variação foi suficiente para unir ainda mais as curvas de cada amostra, tornando as perdas de massa totais dos revestimentos tratados muito próximas àquela do revestimento como aspergido.

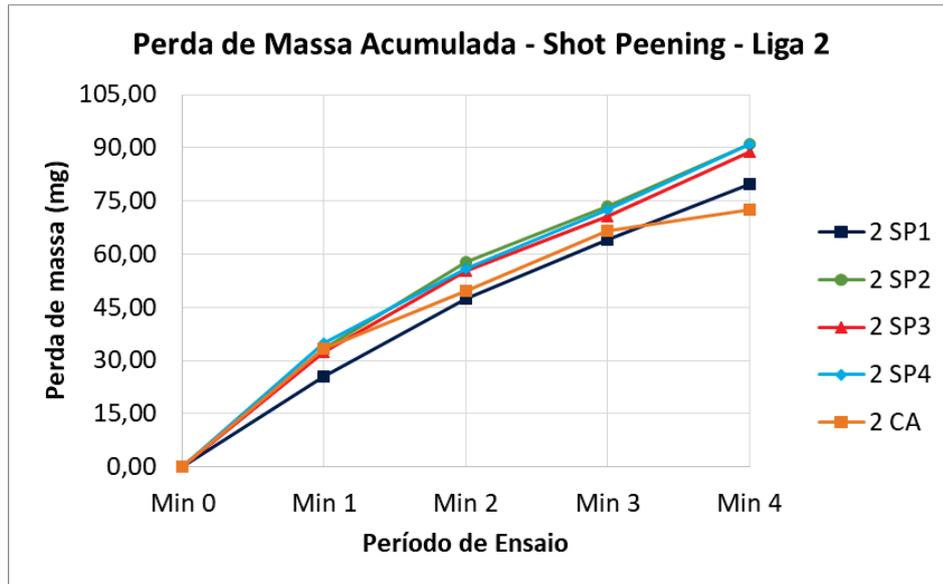
GRÁFICO 14: PERDA DE MASSA ACUMULADA NAS AMOSTRAS DA LIGA 1 COM SHOT PEENING CONSIDERANDO PERDA CAUSADA PELO TRATAMENTO (MINUTO ZERO).



FONTE: O autor (2021).

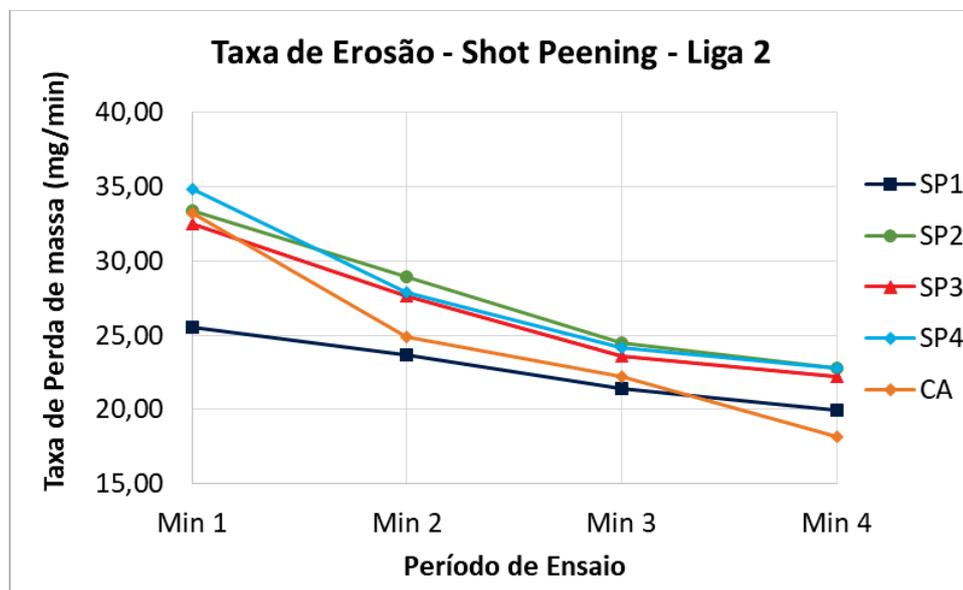
Para a Liga 2, de maior dureza, como já ocorrido nas amostras como aspergidas e também naquelas lixadas e polidas, o desgaste foi mais severo em relação à Liga 1, apresentando perdas ao final do quarto minuto de ensaio na faixa de 70 a 90 mg. Além disso, neste caso, a aplicação do *shot peening* reduziu a resistência à erosão do revestimento, conforme se observa no GRÁFICO 15, o qual desconsidera a perda de massa no “minuto zero” gerada em função do próprio processo de tratamento. Apenas a amostra 2 SP1 apresentou uma melhora, especificamente no primeiro minuto de ensaio, conforme se verifica também no GRÁFICO 16, que exibe a variação de taxa de erosão a cada minuto. No decorrer do restante do ensaio, a taxa de desgaste desta amostra se aproximou das demais.

GRÁFICO 15: PERDA DE MASSA ACUMULADA NOS ENSAIOS DE EROSIÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA 2 TRATADOS COM SHOT PEENING.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 16: VARIAÇÃO DAS TAXAS DE EROSIÃO A CADA MINUTO DE ENSAIO NAS AMOSTRAS DA LIGA 2 TRATADAS COM SHOT PEENING.

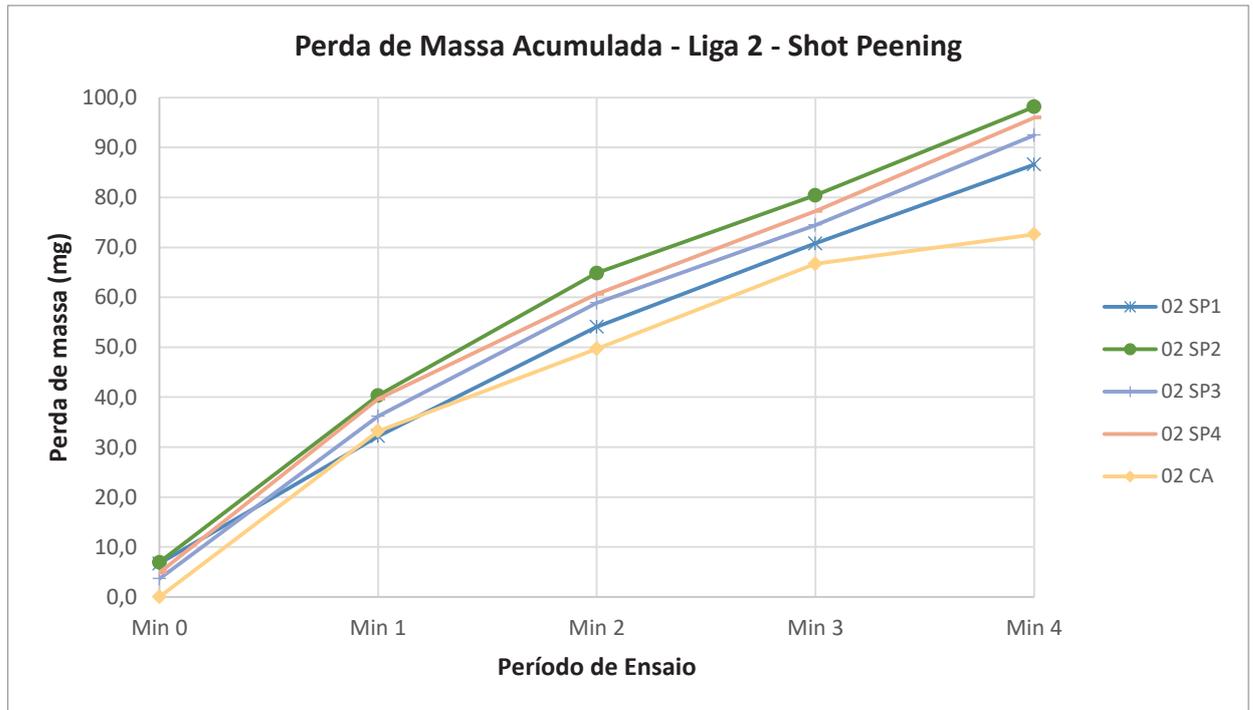


FONTE: O autor (2021).

Quando se considera a perda de material gerada durante o processo de *shot peening*, o maior nível de desgaste total dos revestimentos tratados em comparação com aquele como aspergido fica ainda mais claro, conforme se verifica no GRÁFICO 17. Além disso, percebe-se que a perda de massa em função do *shot peening* foi maior nos revestimentos da Liga 2, onde os valores do “minuto zero” variaram entre

cerca de 4,0 a 7,0 mg, contra 2,0 a 4,0 mg para a Liga 1, conforme detalhado anteriormente na TABELA 8.

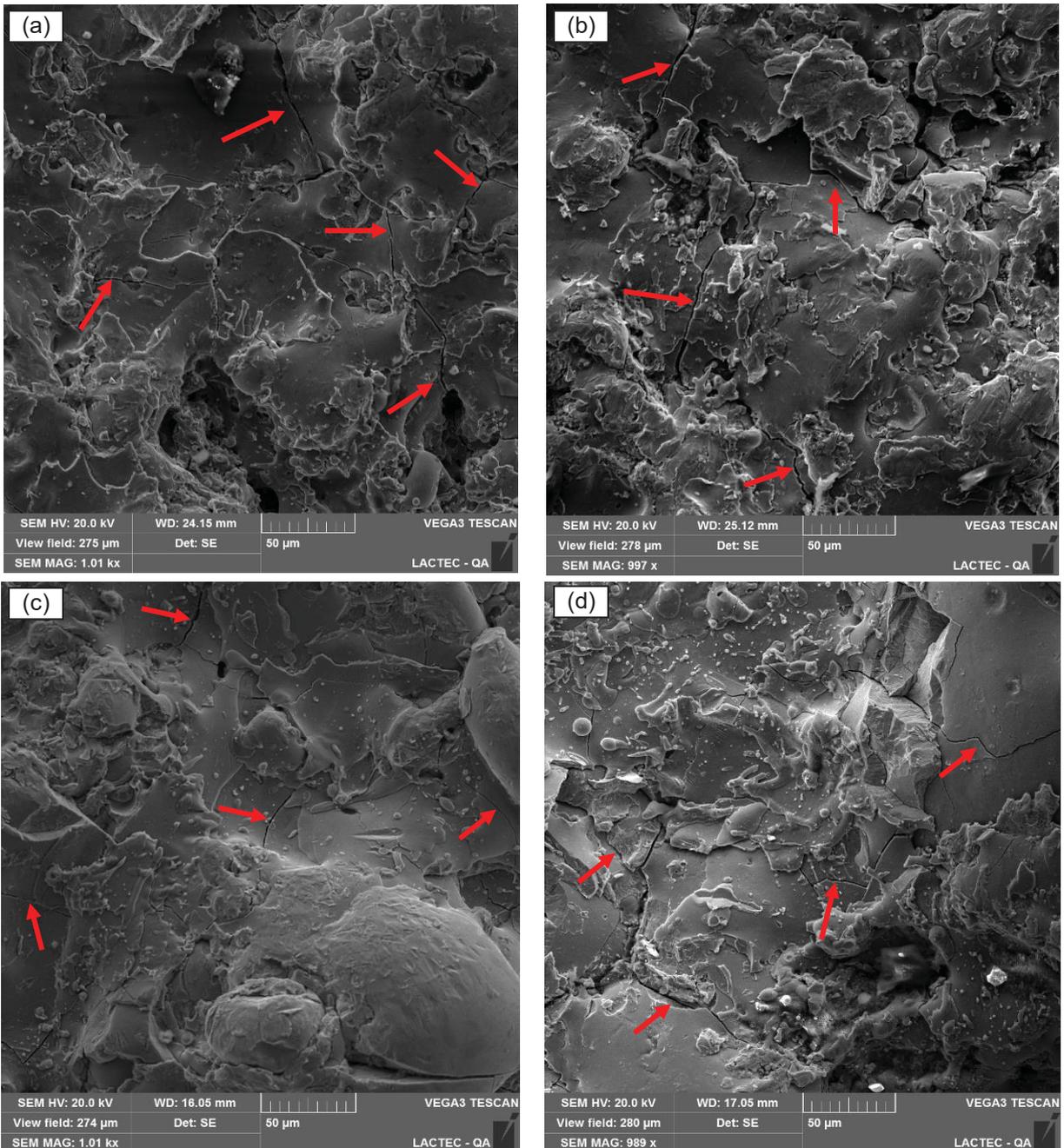
GRÁFICO 17: PERDA DE MASSA ACUMULADA NAS AMOSTRAS DA LIGA 2 COM SHOT PEENING CONSIDERANDO PERDA CAUSADA PELO TRATAMENTO (MINUTO ZERO).



FONTE: O autor (2021).

Analisando as imagens das superfícies dos revestimentos da Liga 2 após a aplicação do *shot peening*, FIGURA 38, percebe-se que, assim como na Liga 1, o jateamento também removeu partículas de baixa adesão, deixando a superfície mais “limpa”. Essa remoção de material é confirmada também pela variação de massa das amostras ocorrida após o tratamento – que resultou nas perdas de massa do “minuto zero” citadas anteriormente. Entretanto, na maioria dos casos, isso não gerou redução na taxa de desgaste e aumentou, inclusive, a perda de massa total. Esse fato pode estar relacionado com um possível aumento do número de trincas (indicadas por setas nas imagens) presentes nos revestimentos da Liga 2, facilitando o desprendimento de material durante o ensaio de erosão.

FIGURA 38: SUPERFÍCIES DAS AMOSTRAS REVESTIDAS COM A LIGA 2 APÓS PROCESSO DE SHOT PEENING. (A) AMOSTRA 2 SP1; (B) AMOSTRA 2 SP2; (C) AMOSTRA 2 SP3; (D) AMOSTRA 2 SP4. AS SETAS INDICAM AS TRINCAS NOS REVESTIMENTOS.

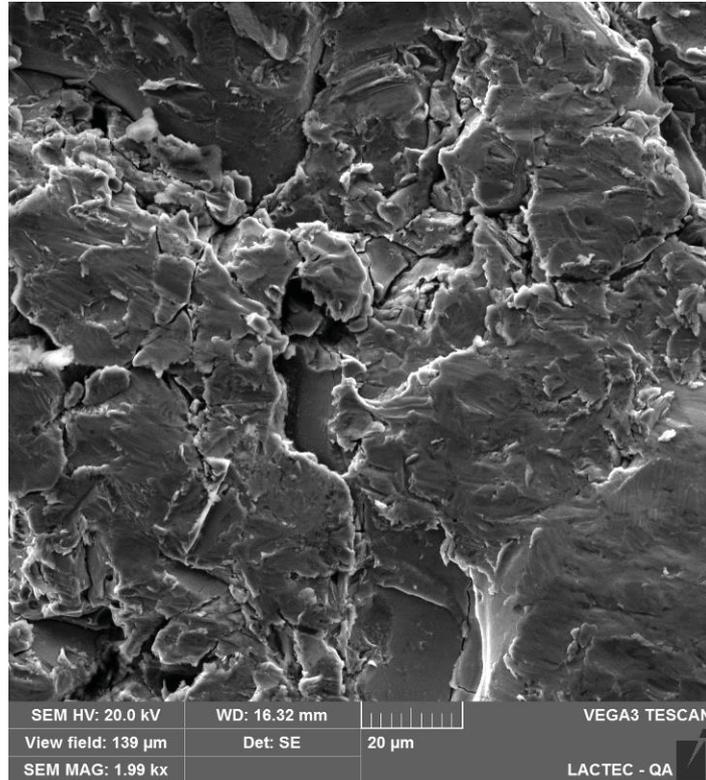


FONTE: O autor (2021).

A FIGURA 39 exibe, na amostra 2 SP3, a superfície da região afetada pelo ensaio de erosão. Assim como já detalhado nos tópicos relativos às amostras como aspergidas e com tratamento de lixamento/polimento, fica claro mais uma vez que o mecanismo de desgaste se dá, em grande parte, pelo trincamento e arrancamento

de pequenas seções do revestimento, em especial nos locais previamente trincados ou interfaces entre lamelas.

FIGURA 39: SUPERFÍCIE DA ÁREA ERODIDA NA AMOSTRA 2 SP3, APÓS OS 4 MINUTOS DE ENSAIO.



FONTE: O autor (2021).

4.3.4 Análise do Planejamento Taguchi

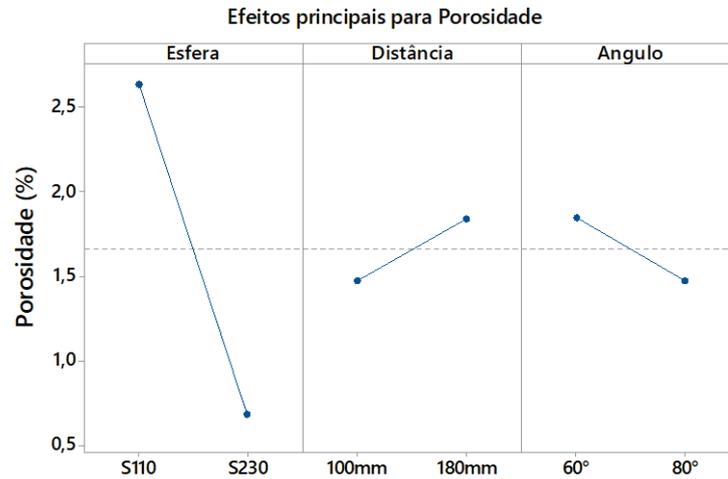
Com o objetivo de analisar quais parâmetros (tipo de esfera, ângulo e distância de jateamento) do processo de *shot peening* tiveram maior influência sobre as características de morfologia e resistência à erosão dos revestimentos, foi realizada avaliação estatística conforme metodologia de planejamento experimental Taguchi (TAGUCHI, 1990; ROY, 2001).

4.3.4.1 Efeito dos Parâmetros de *Shot Peening* na Liga 1

Os GRÁFICO 18 a GRÁFICO 21 exibem, respectivamente, a alteração nas características de porosidade, teor de óxidos, microdureza e resistência à erosão por jato de lama (perda de massa acumulada) do revestimento da liga 1, em função da

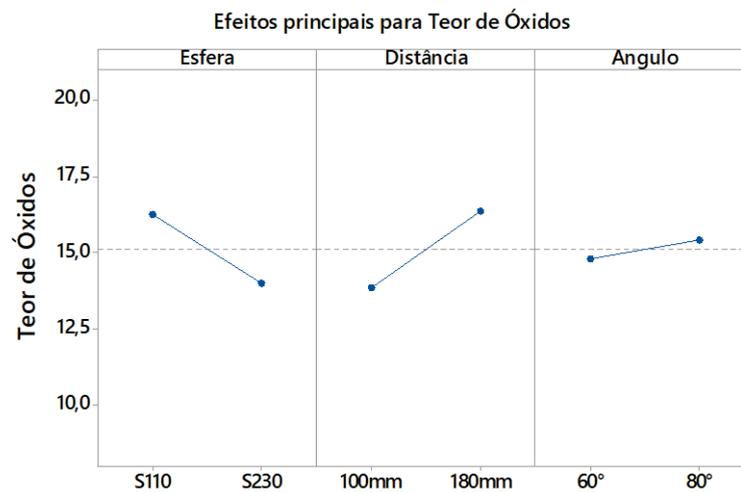
alteração dos parâmetros de *shot peening* – do diâmetro de esfera, ângulo de jateamento e distância de jateamento.

GRÁFICO 18: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA POROSIDADE DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.



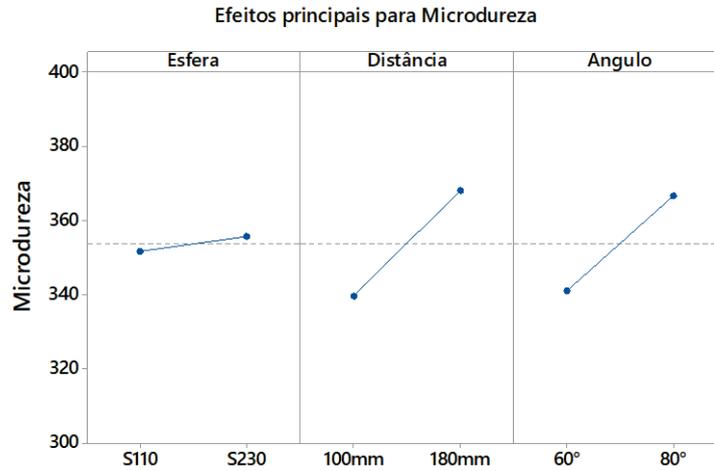
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 19: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NO TEOR DE ÓXIDOS DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.



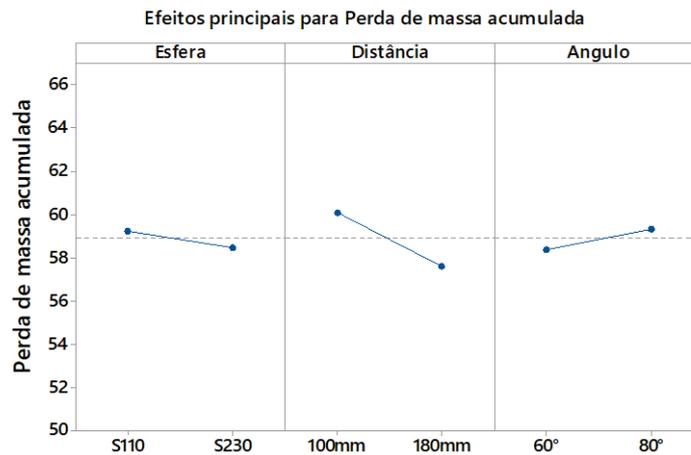
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 20: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA MICRODUREZA (HV0,2) DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 21: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA PERDA DE MASSA ACUMULADA DO REVESTIMENTO DA LIGA 1.



FONTE: O autor (2021).

Assim como já observado quando das análises individuais de morfologia, microdureza e ensaio de erosão, a aplicação do *shot peening* sobre o revestimento da Liga 1 não trouxe grandes alterações. Nos gráficos exibidos acima, observa-se que as variações em função do nível do parâmetro de processo foram pouco significativas, com exceção da porosidade, a qual sofreu maior influência com o aumento do tamanho das esferas de aço.

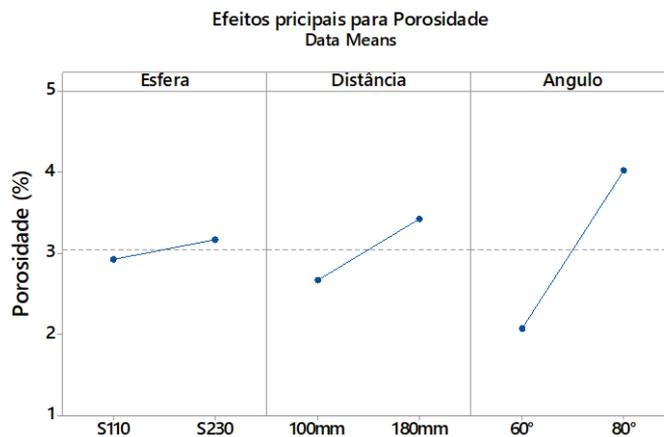
A ausência de alterações significativas é também comprovada através de teste de comparação de médias pelo método de Tukey, previsto na metodologia Taguchi, que permite verificar se dois níveis de um determinado fator compartilham

de médias significativamente iguais, considerando um determinado nível de confiabilidade, que neste caso, foi definido em 99%. Assim como observado nos gráficos, este teste retornou que houve diferença significativa apenas na porosidade, com a alteração do diâmetro da esfera.

4.3.4.2 Efeito dos Parâmetros de *Shot Peening* na Liga 2

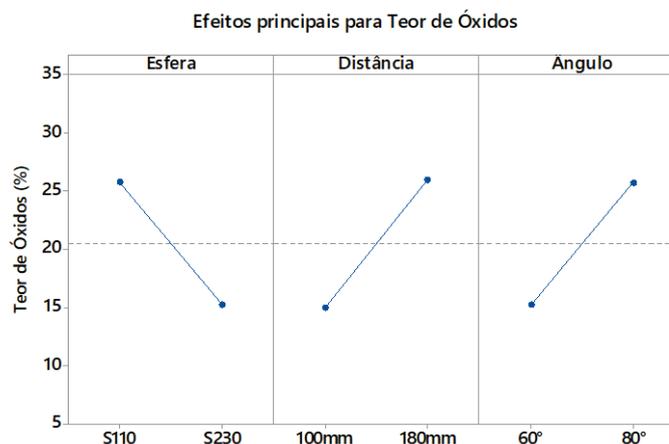
De forma semelhante ao exposto no tópico anterior, referente à Liga 1, os GRÁFICO 22 ao GRÁFICO 25 exibem, respectivamente, os impactos da alteração dos parâmetros de *shot peening* sobre a porosidade, teor de óxidos, microdureza e perda de massa acumulada do revestimento da Liga 2.

GRÁFICO 22: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA POROSIDADE DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.



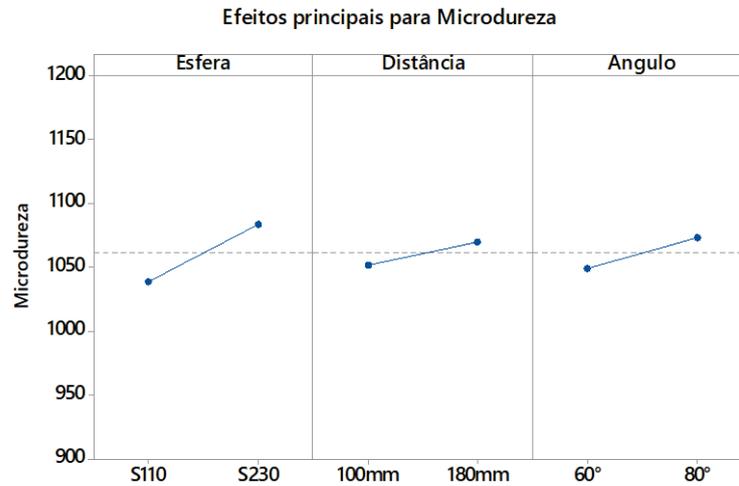
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 23: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NO TEOR DE ÓXIDOS DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.



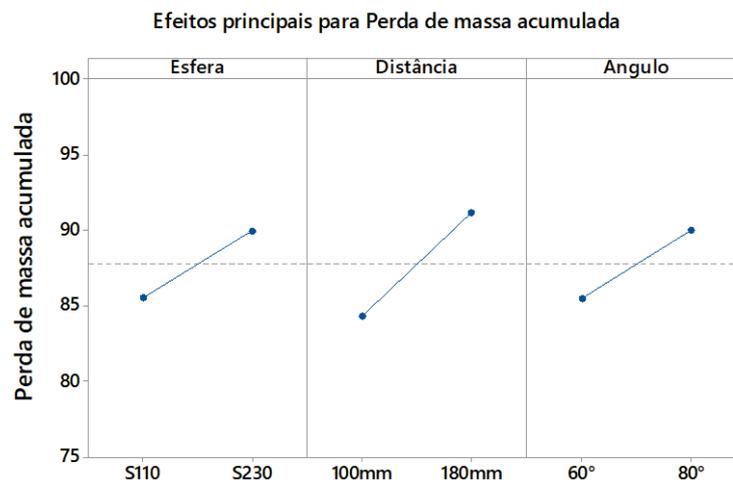
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 24: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA MICRODUREZA (HV0,2) DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 25: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA PERDA DE MASSA ACUMULADA (mg) DO REVESTIMENTO DA LIGA 2.



FONTE: O autor (2021).

De forma similar ao verificado para a Liga 1, no caso da Liga 2 a variação nos níveis dos parâmetros de *shot peening* também não exerceu grande impacto sobre as características do revestimento. Isso também era esperado tendo em vista a pouca alteração dos resultados de cada característica isolada, comparados com o revestimento no estado como aspergido.

Assim como para a Liga 1, referente à porosidade, um único parâmetro gerou alteração mais significativa. Neste caso, entretanto, tal parâmetro foi o ângulo de jateamento. Este fato é comprovado também pelo teste de Tukey. Porém,

conforme visto anteriormente, na prática, a variação da porosidade não foi percebida com clareza.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados detalhados nos tópicos anteriores demonstram que, considerando o ângulo de incidência de 90° no ensaio de erosão por jato de lama, os revestimentos tendem a apresentar comportamento semelhante àquele esperado para material bruto, onde a liga de menor dureza e maior ductilidade tende a apresentar maior resistência ao desgaste (JAVAHERI, PORTER e KUOKKALA, 2018; HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). A microestrutura padrão para revestimentos obtidos por aspersão térmica a arco elétrico – contendo lamelas, óxidos e poros – acabou afetando mais significativamente o revestimento de maior dureza, uma vez que, neste caso, a remoção de material durante os ensaios de erosão ocorreu preferencialmente nas interfaces existentes ao longo da camada depositada.

Em todos os casos testados – ligas e tratamentos – verificou-se que há maior desgaste nos primeiros momentos do processo erosivo. Neste sentido, os tratamentos de lixamento e polimento foram eficazes na redução da taxa inicial de desgaste, através da ação de remoção de partículas pouco aderentes que ficam presentes na superfície dos revestimentos no estado como aspergido. Entretanto, quando se considera o material eliminado pelos próprios tratamentos, percebe-se que a melhora obtida não traz o benefício esperado, levando em conta o tempo total de ensaio aqui considerado. Neste ponto sugere-se que sejam realizados trabalhos futuros mais aprofundados para que se entenda com maior clareza as formas de desgaste que ocorrem nos primeiros segundos de ensaio e como o nível de rugosidade interfere nestas. Uma possível abordagem seria através da realização de períodos de ensaio de poucos segundos, intercalados com análises da superfície erodida em MEV.

O tratamento por *shot peening*, independentemente dos seus parâmetros, também não gerou melhoras significativas ao desempenho dos revestimentos aos ensaios de erosão por jato de lama. Alterações morfológicas causadas por este tratamento foram perceptíveis apenas na liga de menor dureza (Liga 1), através da redução da porosidade e discreta redução das taxas iniciais de desgaste. A partir

das análises do planejamento experimental Taguchi, verificou-se que um maior tamanho de esfera tende a gerar maior redução da porosidade desta liga.

No revestimento de maior dureza (Liga 2) o processo de *shot peening* gerou pequena piora na resistência ao desgaste, possivelmente por colaborar com a formação (ou extensão) de trincas e fraturas nas lamelas superficiais da camada. Durante o processo erosivo, as trincas, assim como demais interfaces presentes no revestimento, agem como pontos preferenciais de remoção de material, que se dá através de mecanismos frágeis, de microtrincamento e lascamento.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de próximos trabalhos cita-se a análise mais aprofundada da forma e mecanismos de desgaste atuantes durante os momentos iniciais do processo erosivo em revestimentos aplicados por aspensão térmica a arco elétrico. Neste trabalho ficou claro que a alteração da condição superficial impacta na taxa de erosão inicial, porém, essa taxa mais elevada não foi totalmente eliminada pelos tratamentos superficiais, nem mesmo com o polimento da amostra. Portanto, é interessante o estudo mais específico dos primeiros momentos de processo erosivo, para que, eventualmente, seja possível propor algum tipo de tratamento superficial mais eficaz para aumento da resistência dos revestimentos.

É interessante também o estudo do comportamento à erosão por jato de lama considerando diferentes ângulos do jato abrasivo, além dos 90° aqui utilizados. Neste trabalho, observou-se que, para o ângulo adotado, o revestimento de menor dureza apresentou maior resistência. Para ângulos de incidência menores, espera-se uma inversão dos resultados, com a liga mais dura apresentando menores taxas de erosão.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao longo deste trabalho, pode-se concluir que:

- Durante o processo de erosão por jato de lama, os revestimentos aplicados por aspensão térmica a arco elétrico tendem a se comportar de maneira similar ao esperado para o material no estado bruto, onde, para um ângulo de

jato de 90 ° em relação à superfície, o revestimento de menor dureza apresentou melhor desempenho;

- Os mecanismos de erosão atuantes nos revestimentos variam em função do nível de dureza. No revestimento mais macio, são predominantes os mecanismos dúcteis de microcorte e microsulcamento, enquanto que na camada de maior dureza, há significativa atuação de mecanismos frágeis, com formação e crescimento de trincas e destacamento de pequenas seções do revestimento;
- Independente do material e tratamento superficial, as maiores taxas de erosão se dão no primeiro minuto de ensaio. A presença de partículas de baixa adesão, como salpicos, na superfície do revestimento tem influência direta neste comportamento, porém não é exclusiva, uma vez que nas condições lixadas e polidas, também houve maior desgaste nos instantes iniciais – ainda que menos evidentes. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para que se avalie o fenômeno de desgaste ao longo de períodos mais curtos;
- Tanto o lixamento quanto o polimento completo dos revestimentos, levam a uma redução da taxa de desgaste considerável, chegando a cerca de 50%, porém apenas durante o início do processo erosivo. Além disso, tal redução não é significativa o suficiente para compensar a perda de massa gerada pelos próprios tratamentos superficiais;
- A aplicação de *shot peening* sobre as camadas gerou alterações quase que insignificantes às morfologias e desempenhos à erosão dos dois revestimentos estudados. O melhor resultado, ocorrido para a Liga 1, apresentou perda de massa total cerca de 5% abaixo daquela apresentada no estado como aspergido. No revestimento mais duro (Liga 2), houve piora na resistência ao desgaste erosivo, possivelmente em função do aumento do número de trincas na camada depositada.

7 REFERÊNCIAS

- A&B DEBURRING. Shot Peening Accessories. 2016. Disponível em: <https://abdeburr.com/shot-peening-accessories/>. Acesso em: 08 fev. 2021.
- ALMEIDA, D. S. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição físico de vapores por feixe elétrons para aplicação como barreira térmica. São José dos Campos: INPE, 175 p., Tese (Doutorado), Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, 2005.
- AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS. Thermal spraying: practice, theory and application. Miami: American Welding Society, 1985.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz por Origem de Combustível. 2021. Disponível em: <https://bityli.com/ObWtP>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- ASM INTERNATIONAL (United States), Vol. 5, Surface Engineering, Materials Park, OH, Estados Unidos, ASM Handbook, 1994.
- ASM INTERNATIONAL (United States) (comp.). Handbook of Thermal Spray Technology. Materials Park: Asm International, 2004. Edited by J.R. Davis.
- ASTM INTERNATIONAL. G 40: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. West Conshohocken: ASTM International, 2017. 8 p.
- BARRIOS, Daniel Benítez; GONZALES, Miguel Angel Calle; ANGELO, Edvaldo; GONÇALVES, Edison; ANDRADE, Arnaldo H. Paes de. O Processo de Jateamento como Via para Melhorar a Resistência a Fadiga de Juntas Soldadas: uma Revisão: (parte i: ligas de alumínio e outros materiais). Soldagem e Inspeção, [S. L.], v. 12, n. 1, p. 63-72, jan. 2007.
- BERTUOL, Kauê. Estudo do Efeito Sinérgico Cavitação/Erosão em Revestimentos de Carboneto de Cromo e Tungstênio Depositados por Aspersão Térmica de Alta Velocidade. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.
- BERTUOL K., PUKASIEWICZ, A. G. M., SUCHARSKI, G. B., Análise da Influência de Parâmetros de Shot Peening na Dureza Superficial e Rugosidade do Aço ASTM A743-CA6NM, 23º CBCIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2018.
- BOUSSER, Etienne. Solid Particle Erosion Mechanisms Of Protective Coatings For Aerospace Applications. 2013. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Génie Physique, Département de Génie Physique, Université de Montréal, Montreal, 2013.
- BRAGANÇA, B. C., Desgaste Erosivo de Revestimentos WC-CR-CO Depositados Via Processos de Soldagem PTA-P e por Manta Sinterizada, Universidade Federal do Espírito Santo, Dissertação (Mestrado), Vitória, 2016.

CAO, W.; FATHALLAH, R.; CASTEX, L.. Correlation of Almen arc height with residual stresses in shot peening process. *Materials Science And Technology*, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 967-973, set. 1995. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1179/mst.1995.11.9.967>.

CMV CONSTRUÇÕES MECÂNICAS LTDA. (Brasil). Gabinete de Jateamento por Sucção. Catálogo técnico. Disponível em: <https://cutt.ly/SazXqpw>. Acesso em: 18 jul. 2020.

FAUCHAIS, Pierre L.; HEBERLEIN, Joachim V. R.; BOULOS, Maher I.. *Thermal Spray Fundamentals: from powder to part*. New York: Springer, 2014.

FINNIE, Iain. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 87-103, mar. 1960. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7).

FST - FLAME SPRAY TECHNOLOGIES. Arc Wire Spray. Disponível em: <https://www.fst.nl/systems/arc-wire-spray/>. Acesso em: 21 jun. 2020.

GONZÁLEZ, Juan; PERAL, Luis Borja; ZAFRA, Alfredo; FERNÁNDEZ-PARIENTE, Inés. Influence of Shot Peening Treatment in Erosion Wear Behavior of High Chromium White Cast Iron. *Metals*, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 933-945, 27 ago. 2019. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/met9090933>.

GOPI, R., SARAVANAN, I., DEVARAJU, A., LOGANATHAN, G. B., Investigation of Shot Peening Process on Stainless Steel and Its Effects for Tribological Applications. *Materials Today: Proceedings* 22, p. 580-584, 2020.

GREWAL, H.s.; ARORA, H.s.; AGRAWAL, Anupam; SINGH, H.; MUKHERJEE, S.. Slurry Erosion of Thermal Spray Coatings: effect of sand concentration. *Procedia Engineering*, [S.L.], v. 68, p. 484-490, 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.210>.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2017.

INJERMAC JATEAMENTO E PINTURA (Brasil). Jateamento Abrasivo: tudo sobre este incrível serviço. Tudo sobre este Incrível Serviço. Disponível em: <http://injermac.com/jateamento/>. Acesso em: 18 jul. 2020.

JAVAHERI, Vahid; PORTER, David; KUOKKALA, Veli-Tapani. Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials. *Wear*, [S.L.], v. 408-409, p. 248-273, ago. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.010>.

KUMAR, H.; CHITTOSIYA, C.; SHUKLA, V. N. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 6413–6420, 2018.

LIMA, C.R.C; LIBARDI, R.; CAMARGO, F.; FALS, H. C.; FERRARESI, V. A.. Assessment of Abrasive Wear of Nanostructured WC-Co and Fe-Based Coatings Applied by HP-HVOF, Flame, and Wire Arc Spray. *Journal Of Thermal Spray Technology*. [S. L], p. 1059-9630. 30 abr. 2014.

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

LIMA, C.C., TREVISAN, R. *Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações*. Artliber Editora, São Paulo, Brasil, 2007.

LIRA, S. *Planejamento de Experimentos*. Apostila. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

LIU, C.; LU, H.; QIN, E.; YE, L.; WU, S.. The FeCr-Based Coating by On-Site Twin-Wire Arc Spraying for Proactive Maintenance of Power Plant Components. *Journal Of Thermal Spray Technology*, [S.L.], 3 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01138-y>.

MALEKI, Erfan; UNAL, Okan; KASHYZADEH, Kazem Reza. Efficiency Analysis of Shot Peening Parameters on Variations of Hardness, Grain Size and Residual Stress via Taguchi Approach. *Metals And Materials International*, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 1436-1447, 14 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC.

<http://dx.doi.org/10.1007/s12540-019-00290-7>.

MARIANO, C.; PAREDES, R. S. C.; FRARE JÚNIOR, A. F. Desenvolvimento de Revestimentos de Nióbio Resistentes a Elevadas Temperaturas Depositados por Aspersão Térmica. 4º PDPETRO, 21 a 24 de Outubro de 2007, Campinas, SP., 2007.

MAYER, André R.; BERTUOL, Kaue; SIQUEIRA, Irene B.A.F.; CHICOSKI, Andre; VÁZ, Rodolpho F.; SOUSA, Milton J. de; PUKASIEWICZ, Anderson G.M.. Evaluation of cavitation/corrosion synergy of the Cr3C2-25NiCr coating deposited by HVOF process. *Ultrasonics Sonochemistry*, [S.L.], v. 69, p. 105271-105280, dez. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105271>.

MENEZES, D. D. de. Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto. Rio de Janeiro, 2007, 178 f., Dissertação (Doutorado), Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MIRA WELDING. *Mira Wire CRV-13 - Desenvolvimento Especial*. São Paulo: [s. n.], 2019.

MOJENA, Miguel Ángel Reyes; OROZCO, Mario Sánchez; FALS, Hipólito Carvajal; ZAMORA, Roberto Sagaro; LIMA, Carlos Roberto Camello. A comparative study on slurry erosion behavior of HVOF sprayed coatings. *Dyna*, [S.L.], v. 84, n. 202, p. 239-

246, 1 jul. 2017. Universidad Nacional de Colombia.
<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n202.56542>.

MORE, S.R.; BHATT, D.V.; MENGHANI, J.V.. Study of the Parametric Performance of Solid Particle Erosion Wear under the Slurry Pot Test Rig. *Tribology In Industry*, [S.L.], v. 39, n. 4, p. 471-481, dez. 2017. Faculty of Engineering, University of Kragujevac.
<http://dx.doi.org/10.24874/ti.2017.39.04.06>.

MOURA, Ailson P.; MOURA, Adriano Aron F.; ROCHA, Ednardo P.. *Engenharia de Sistemas de Potência: geração hidroelétrica e eolioelétrica*. Fortaleza: Edições UFC, 2019.

MULLER, Glaysson de Mello. *Despacho de Máquinas e Geração de Usina Hidrelétrica Individualizada Utilizando Algoritmos Genéticos*. 2010. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

NORBLAST PINTURA E JATEAMENTO (São Paulo). *Granalha de Aço*. Disponível em: <http://www.norblast.com.br/granalha-de-aco.html>. Acesso em: 19 jan. 2021.

OERLIKON METCO. BRO-0005.6: *An Introduction to Thermal Spray*. 6. ed. 24 p. 2016.

OERLIKON METCO. BRO-0007.7: *Electric Arc Wire Spray Solutions*. 16 p. 2018.

OERLIKON METCO. *Material Product Data Sheet: Iron-Based, High Chromium (Cr > 20%) Thermal Spray Wires*. [S. l.: s. n.], 2015.

O'HARA, P. et al. Superfinishing and Shot Peening of Surfaces to optimise roughness and stress. *Transactions On Engineering Sciences*, [S. L.], v. 25, p. 321-330, 1999.

PAREDES, R. S. C.; *Aspersão Térmica, Curitiba, Apostila (Curso de Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos) – Universidade Federal do Paraná, 1999.*

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

PUKASIEWICZ, Anderson Geraldo Marena; CAPRA, Andre Ricardo; VAZ, Rodolpho Fernando. *Cavitation Resistance Of Asp Coatings, Ultrasonic Testings And Francis Runner Field Performance Comparison*. In: *Materials Science And Technology (MS&T)*, 13., 2013, Montreal. *Proceedings*. Montreal: Ms&t13, 2013. p. 799-805.

PUKASIEWICZ, A. G. M.; *Desenvolvimento de Revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni Resistentes à Cavitação Depositados por Aspersão ASP, Curitiba, 2008, Dissertação (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos da Universidade Federal do Paraná.*

REGO, Ronnie Rodrigo. Influência Do Uso De Distribuição Bimodal De Classes De Granalha No Processo De Shot Peening Sobre O Perfil De Tensões Residuais De Engrenagens. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec, Salvador, 2011.

RODRIGUES, L. D., Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados. Dissertação (mestrado), PUC-Rio, 2007.

ROSALIE, Beugre Ouronon Marie. Análise Experimental e Numérico-Computacional da Influência do Jateamento com Granalha na Propagação de Trincas. 2019. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ROY, R. K. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. New York: John Wiley & Sons, 2001.

SANGAL, Saurabh; SINGHAL, M. K.; SAINI, R. P.. Hydro-abrasive erosion in hydro turbines: a review. International Journal Of Green Energy, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 232-253, 12 fev. 2018. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2018.1431546>.

SANTA, J.F.; BAENA, J.C.; TORO, A.. Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery. Wear, [S.L.], v. 263, n. 1-6, p. 258-264, set. 2007. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.061>.

SANTA, J.F.; ESPITIA, L.A.; BLANCO, J.A.; ROMO, S.A.; TORO, A.. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. Wear, [S.L.], v. 267, n. 1-4, p. 160-167, jun. 2009. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.018>.

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

SHARMA, Mithlesh; GOYAL, Deepak Kumar; KAUSHAL, Gagandeep. Tribological Investigation of HVOF Sprayed Coated Turbine Steel under Varied Operating Conditions. Materials Today: Proceedings, [S. L.], v. 24, p. 869-879, 2020.

SILVA, Jardel Jackson de Oliveira. Efeito Do Processo De Shot Peening Com Diferentes Condições De Deflexão De Almen Nos Perfis De Tensão Residual E Microdureza E Rugosidade Em Um Aço Cementado Temperado/Revenido Utilizado Na Fabricação De Engrenagens Automotivas. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SUCHARSKI, Gustavo Bavaresco. Estudo da Erosão por Cavitação Sobre Diferentes Morfologias de Revestimentos de FeMnCrSiB Aplicados por Aspersão Térmica Chama FS e HVOF com Tratamento de Shot Peening. 2016. 144 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SUCHARSKI, G. B.; PUKASIEWICZ, A. G. M.; VAZ, R. F.; PAREDES, R. S. C.. Shot Peening Effect on the Morphology and Roughness of HVOF Coatings. In: 2015 Thermal Spray Conference (ITSC), 2015, Long Beach, California. Annals of 2015 ITSC, 2015.

SUGIYAMA, K.; NAKAHAMA, S.; HATTORI, S.; NAKANO, K. Slurry wear and cavitation erosion of thermal-sprayed cermets. *Wear*, v. 258, n. 5–6, p. 768–775, 2005.

TAGUCHI, G., Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

TAKIMI, A. S. Obtenção de superligas de NiCrAlY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF). Dissertação (mestrado). Porto Alegre: UFRGS, 2004.

THAKUR, L.; ARORA, N.; JAYAGANTHAN, R.; SOOD, R. An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC-CoCr coatings. *Applied Surface Science*, v. 258, n. 3, p. 1225–1234, 2011.

VAZ, Rodolpho F.; SUCHARSKI, Gustavo B.; CHICOSKI, André; SIQUEIRA, Irene B. A. F.; TRISTANTE, Romildo; PUKASIEWICZ, Anderson G. M.. Comparison of FeMnCrSi Cavitation Resistance Coatings Deposited by Twin-Wire Electric Arc and High-Velocity Oxy-Fuel Processes. *Journal Of Thermal Spray Technology*, [S.L.], 24 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01145-z>.

VUORISTO, P.. Thermal Spray Coating Processes. *Comprehensive Materials Processing*, [S.L.], p. 229-276, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-096532-1.00407-6>.

WANG, Yu-Fei; YANG, Zhen-Guo. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, [S.L.], v. 265, n. 5-6, p. 871-878, ago. 2008. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.014>.

WU, Jizhan; LIU, Huaiju; WEI, Peitang; LIN, Qinjie; ZHOU, Shuangshuang. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *International Journal Of Mechanical Sciences*, [S.L.], v. 183, p. 105785-105796, out. 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>.

YANG, Zhaorui; LEE, Youngseog; HE, Shangwen; JIA, Wenzhen; ZHAO, Jun. Analysis of the Influence of High Peening Coverage on Almen Intensity and Residual Compressive Stress. *Applied Sciences*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 105-121, 21 dez. 2019. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/app10010105>.

YURY, Korobov; FILIPPOV, Michael; MAKAROV, Aleksey; MALYGINA, Irina; SOBOLEVA, Natalia; FANTOZZI, Davide; ANDREA, Milanti; KOIVULUOTO, Heli; VUORISTO, Petri. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering. *Coatings*, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 71, 13 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings8020071>.