

Comportamento à Erosão por Jato de Lama de Revestimento Aplicado por Aspersão Térmica a Arco Elétrico Com Diferentes Tratamentos Superficiais

André Chicoski¹ , Ramón Sigifredo Cortés Paredes¹ , Gustavo Bavaresco Sucharski² , Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz³ 

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

² Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec, Curitiba, PR, Brasil.

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Como citar: Chicoski A, Cortés Paredes RS, Sucharski GB, Pukasiewicz AGM. Comportamento à erosão por jato de lama de revestimento aplicado por aspersão térmica a arco elétrico com diferentes tratamentos superficiais. Soldagem & Inspeção. 2022;27:e2715. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.15>

Resumo: No Brasil mais de 60% da energia elétrica vem da geração hidrelétrica. Neste tipo de geração, alguns componentes são frequentemente expostos a fenômenos de desgaste, sendo um dos principais a erosão por partículas sólidas. A utilização de revestimentos é uma interessante alternativa para a redução de desgaste, sendo que a aspersão térmica se destaca como uma solução de baixo impacto ao material base do componente. Neste trabalho, uma liga comercial para aplicações anti-desgaste foi aplicada por aspersão térmica a arco elétrico (ASP) em substrato de aço carbono e submetida a tratamentos superficiais de lixamento, polimento e jateamento com esferas de aço (*shot peening*). Os revestimentos com e sem tratamentos superficiais foram avaliados quanto à morfologia e dureza e então submetidos a ensaios de erosão por jato de lama (*slurry jet*). Foi verificado que o revestimento tende a apresentar os mesmos mecanismos de erosão de materiais brutos. Além disso, observou-se que o lixamento e polimento reduzem a erosão nos primeiros minutos de ensaio, porém o ganho não compensa a massa perdida na execução dos próprios tratamentos. O *shot peening* reduziu a resistência à erosão do revestimento.

Palavras-chave: Erosão; Aspersão térmica; Jato de lama; Revestimento.

SLURRY-JET EROSION BEHAVIOUR OF WIRE ARC-SPRAYED COATING WITH DIFFERENT SURFACE TREATMENTS

Abstract: Currently in Brazil, more than 60% of electric energy comes from hydro generation. In hydroelectric generation, some mechanical components are often exposed to wear phenomena, and solid particle erosion is one of the most usual. The use of coatings is an interesting alternative to reduce the wear and thermal spray technology appears as a relevant solution with minimum impact to the component substrate. In this work, a commercial wear resistant alloy was applied on carbon steel substrate by Arc Spray Process (ASP) and subjected to surface finishing of single-step sanding, full polishing and shot peening. Coatings with and without surface treatments were evaluated for morphology and hardness and then subjected to slurry jet erosion tests. The results indicated that the coating tends to present the same erosion mechanisms expected for bulk materials. The surface sanding and polishing reduced the initial wear rates however, it did not compensate the mass loss caused by the finishing processes themselves. The shot peening reduced the erosion resistance of the coating.

Key-words: Erosion; Thermal spray; Slurry-jet; Coating.

1. Introdução

No Brasil, atualmente, 83% da energia elétrica gerada vem de fontes renováveis, sendo a principal delas a hidráulica, a qual representa quase 62% da matriz energética, com mais de 109 GW de potência instalada [1].

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) [2]. A partir dessas informações define-se o tipo de rotor a ser utilizado nas turbinas da usina, podendo ser do tipo Pelton, para grandes quedas, Francis, para quedas médias e, Kaplan ou Bulbo para quedas reduzidas [3].

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. Neste cenário, um dos principais fenômenos de desgaste

Recebido: 28 Nov., 2021. Aceito: 10 Jun., 2022.

E-mails: andrechicoski@gmail.com (AC), ramon@ufpr.br (RSCP), gustavo.sucharski@lactec.org.br (GBS), anderson@utfpr.br (AGMP)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a [licença Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

é a erosão por partículas sólidas, onde o desgaste é causado por partículas duras que impactam contra uma superfície, carregados por um fluxo de gás ou líquido. Nos casos em que o fluido de transporte é um líquido, utiliza-se o termo erosão por lama [4]. A ocorrência do fenômeno 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 [5].

A aplicação de revestimentos por aspersão 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 aspersão térmica para proteção de turbinas hidráulicas contra cavitação, erosão e/ou corrosão [6-11]. Uma das principais vantagens da aplicação desses revestimentos é eliminação da necessidade de recuperação por soldagem dos rotores [6], 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.

Além da composição química, outros fatores como parâmetros de processo de deposição, dureza, teores de poros e óxidos, acabamento superficial e presença de tensões residuais também podem, eventualmente, afetar o desempenho do revestimento sob desgaste. No que se refere à alteração das características superficiais da camada aplicada, técnicas simples como lixamento, polimento ou jateamento com esferas, frequentemente chamado pelo seu termo em inglês – *shot peening* – podem ser utilizados. Este último também permite o alívio de tensões residuais de tração na superfície, ou até mesmo a criação de tensões compressivas [12]. Entretanto, não se conhece a real influência dessas técnicas sobre a resistência ao desgaste erosivo dos revestimentos aplicados por aspersão térmica.

Este trabalho busca, portanto, verificar a aplicabilidade e a eficiência dos processos de lixamento, polimento e *shot peening* na resistência à erosão de um revestimento de liga comercial para fins anti-desgaste, aplicado pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico (ASP – Arc Spray Process). Para avaliar a resposta dos revestimentos ao desgaste erosivo por partículas sólidas, foram realizados nas amostras revestidas ensaios de erosão por jato de lama. Neste ensaio um jato de água misturado com um material abrasivo, no caso, areia, é direcionado contra a superfície do material ensaiado, promovendo o desgaste acelerado. A partir das análises de perda de massa e aspecto superficial, correlacionadas com os parâmetros de ensaio e características do material ensaiado, definem-se as taxas de erosão e mecanismos de desgaste atuantes.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais utilizados

Para este estudo foi utilizada a liga comercial, de aplicação específica por aspersão térmica, METCO 8222, fornecida na forma de arame tubular. De acordo com o fabricante [13], os revestimentos obtidos a partir deste material apresentam alta dureza e são recomendados para aplicações que demandam resistência à abrasão e erosão, assim como a corrosão e oxidação. A Tabela 1 exibe a composição química da liga.

Tabela 1. Composição química da liga selecionada para o revestimento (% em massa) [12].

Nome Comercial	Fe	C	Si	Mn	Cr	Outros (máx.)
METCO 8222	Bal.	5,0	-	1,0	28,0	1,5

Os revestimentos foram aplicados sobre corpos de prova de aço SAE 1020 com espessura de 4,8 mm e dimensões de aproximadamente 100 x 40 mm.

2.2. Aplicação dos revestimentos

Para a deposição pelo processo arco elétrico, utilizou-se fonte 350 A, com pistola ARC 340, regulado com os parâmetros de processo exibidos na Tabela 2. A aplicação dos revestimentos foi realizada de maneira robotizada, com auxílio de robô de seis eixos deslocável sobre trilho, exibido na Figura 1.

Tabela 2. Parâmetros do processo de deposição.

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

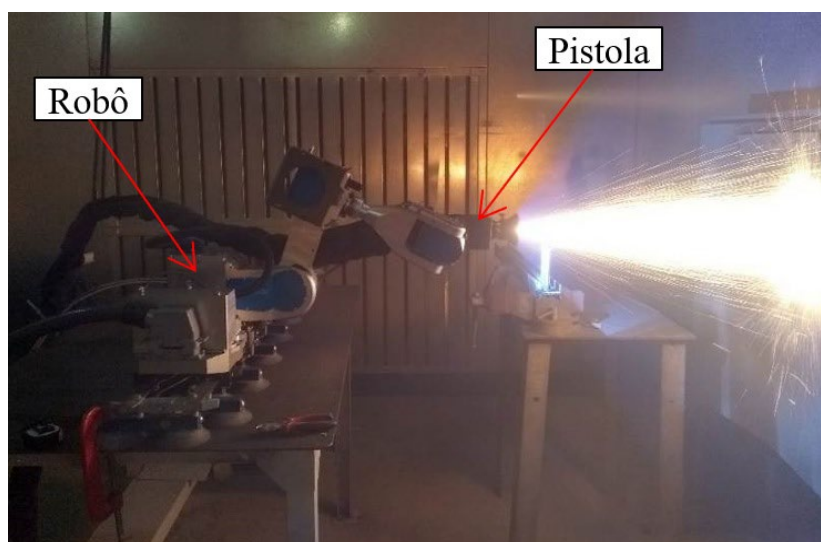


Figura 1. Aplicação robotizada dos revestimentos.

A preparação superficial das chapas para a aplicação dos revestimentos foi 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 . As medições de rugosidade foram realizadas através de rugosímetro digital portátil. Em cada chapa foram realizadas seis medições, sendo três longitudinais e três transversais ao comprimento.

2.3. Tratamentos superficiais

2.3.1. Lixamento e polimento

Para a avaliação da influência da redução da rugosidade superficial inicial sobre a resistência ao desgaste, foram utilizadas seções de cerca de 40 x 25 mm preparadas em duas maneiras diferentes: polimento completo (amostras PO) e lixada (amostras LX). 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.

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. Para tal, foi utilizada balança analítica de quatro casas decimais.

2.3.2. Shot peening

Tendo em vista que o processo de *shot peening* é mais complexo que o polimento e lixamento e que depende da regulagem de seus parâmetros, buscou-se também verificar a influência desses parâmetros sobre as características do revestimento tratado e sua 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.

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 3. 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 3. Fatores e níveis variados nos testes com *shot peening*.

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

A Tabela 4 exibe a matriz de experimentos com *shot peening*, conforme definição pela metodologia Taguchi.

Tabela 4. Matriz de experimentos com *shot peening*.

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

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 2 exibe o aparato.

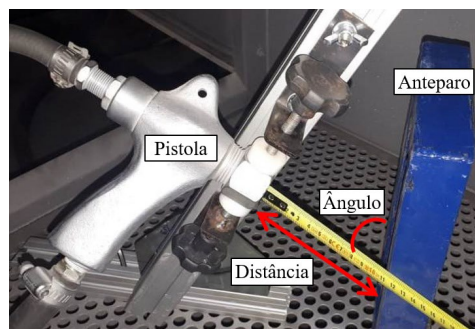


Figura 2. Dispositivo para regulagem do ângulo e distância de *shot peening*.

O *shot peening* foi realizado sobre a área total de cada amostra revestida de 100 × 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 é utilizado no ensaio não destrutivo de partículas magnéticas, facilitando a observação das indicações deste. O produto gera uma fina camada branca, de aderência 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. 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.

2.3.3. Ensaio e análises

Para avaliar a resposta ao desgaste erosivo do revestimento, em seu estado como aspergido e com os tratamentos superficiais citados anteriormente, foram realizados ensaios de erosão por jato de lama utilizando-se do equipamento Slurry Jet Tester, Figura 3, instalado no campus de Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PG), baseado na norma ASTM G73 [14]. A Tabela 5 exibe os parâmetros de ensaio utilizados.



Figura 3. Equipamento de ensaio de erosão por jato de lama - *slurry jet tester*.

Tabela 5. 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	1, 2, 3 e 4 min

Nos ensaios foram necessários corpos de prova de 40 × 25 mm. 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. 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.

Para correlacionar a perda de massa gerada nos próprios tratamentos superficiais com aquela ocorrida nos ensaios de erosão, a partir das áreas totais das amostras e das variações de massa verificadas durante o lixamento, polimento e *shot peening*, foi calculada a perda referente apenas à área efetiva do ensaio, onde se considerou um diâmetro médio de 10,0 mm. A Tabela 6 exhibe os valores considerados e calculados da perda de massa no “minuto zero” (antes do ensaio de erosão) das amostras lixadas, polidas e tratadas com *shot peening*.

Tabela 6. 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)
LX	493,30	959,11	0,514		40,40
PO	565,00	970,36	0,582		45,73
SP1	330,4	3880,8	0,085	78,54	6,687
SP2	334,2	3782,8	0,088		6,939
SP3	183,1	3920,0	0,047		3,669
SP4	240,8	3880,8	0,062		4,873

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:

- Morfologia da seção transversal dos revestimentos através de preparação metalográfica e análise em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV);
- Quantificação de poros e óxidos, baseada no método B da norma ASTM E2109-01 [15], a partir de imagens das seções transversais dos revestimentos obtidas em MEV, com ampliação de 500 X, utilizando o software de análise de imagens Stream Essentials, através da técnica de threshold, onde, para determinados intervalos de tons de cinza, define-se três constituintes: lamelas metálicas, óxidos e poros;
- Morfologia de superfície através de microscópio eletrônico de varredura (MEV);
- Pesagem em balança analítica com quatro casas decimais;
- Medição de dureza de microindentação Vickers nas seções transversais dos revestimentos, com aplicação de carga de 200 g. Foram realizados três perfis de indentações ao longo da seção transversal do revestimento, cada um com três pontos ao longo da espessura.

As análises de morfologia, quantificação de poros e óxidos e dureza de microindentação foram realizadas apenas nas amostras como aspergido e com *shot peening*, uma vez que o lixamento e polimento não alteram tais propriedades.

3. Resultados e Discussões

3.1. Morfologia e dureza

3.1.1. Revestimento no estado “como aspergido”

A Figura 4 exhibe a morfologia da seção transversal do revestimento no estado como aspergido, em dois níveis de ampliação. A camada apresenta morfologia comum ao processo de aplicação por arco elétrico [6,16-18], onde se observa as lamelas achatadas do material metálico (fase clara), envoltas por filmes de óxidos e com a presença de poros.

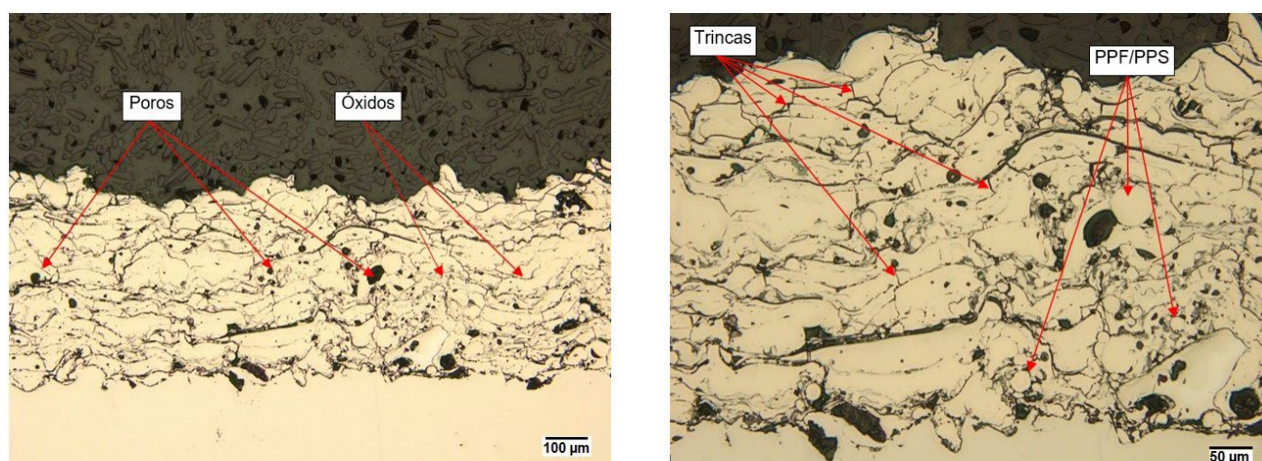


Figura 4. Morfologia da seção transversal do revestimento no estado como aspergido.

Além da morfologia esperada para este tipo de revestimento, observa-se a presença de pequenas trincas, que crescem verticalmente atravessando algumas lamelas. 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 4 essas partículas são identificadas como “PPF/PPS” (partícula parcialmente fundida/partícula previamente solidificada).

A Tabela 7 exibe os valores de poros e óxidos medidos a partir de análise de imagens da seção transversal do revestimento.

Tabela 7. Valores de porosidade e oxidação nas amostras no estado como aspergido.

Revestimento	Medida	% Poros	% Óxidos
Como Aspergido	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

A Tabela 8 exibe os resultados das medições de dureza de microindentação no revestimento.

Tabela 8. Valores de dureza de microindentação HV0,2 no revestimento no estado como aspergido.

Revestimento	Como Aspergido		
Perfil	A	B	C
Medida 1	963	951	1189
Medida 2	1003	1023	822
Medida 3	1105	849	1254
Média Geral		1018	
Desvio Padrão		136	

Os altos valores de dureza 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. [19], 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 em revestimento de base FeCr com adição de B, Si e Mn, também depositado por processo de aspersão térmica a arco elétrico [15]. Neste caso o autor justifica a elevada dureza em função da formação de boretos na camada depositada.

3.1.2. Revestimento com *shot peening*

As morfologias das amostras tratadas com *shot peening*, em aumento de 200 X, podem ser observadas na Figura 5.

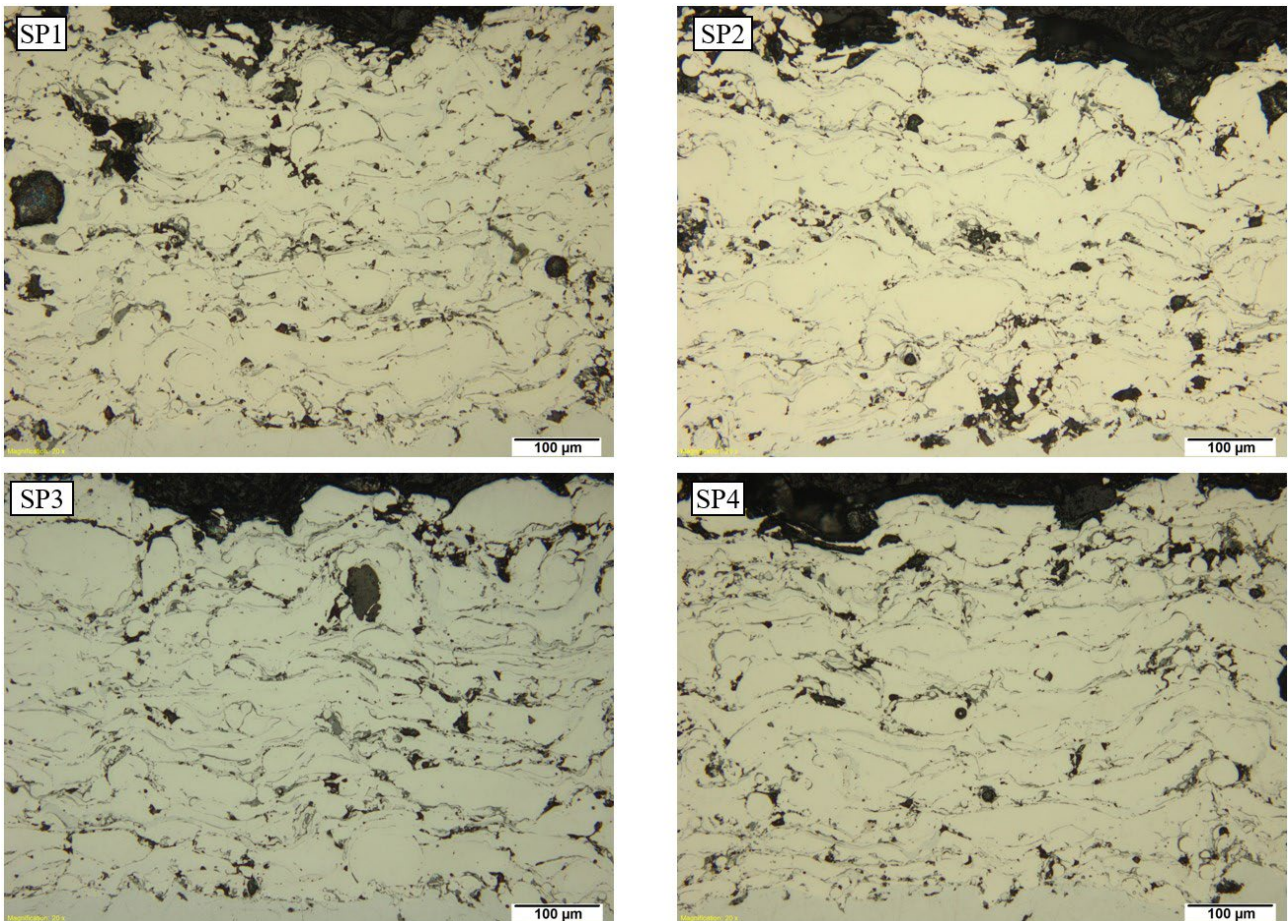


Figura 5. Morfologias dos revestimentos após aplicação de *shot peening* com diferentes parâmetros de processo (valor das escalas – 100 µm). Ampliação 200 x.

Observando as imagens acima, não se percebe alterações significativas em relação à morfologia do revestimento como aspergido. Isso é comprovado quando se analisam os resultados de teor de poros e óxidos, exibidos no gráfico da Figura 6, onde os resultados das amostras tratadas com *shot peening* são comparados com aquela sem qualquer tratamento superficial (como aspergido – CA). Os valores de porosidade variam, inclusive para níveis acima daquele no estado original, aparentemente, sem relação com o tratamento superficial realizado.

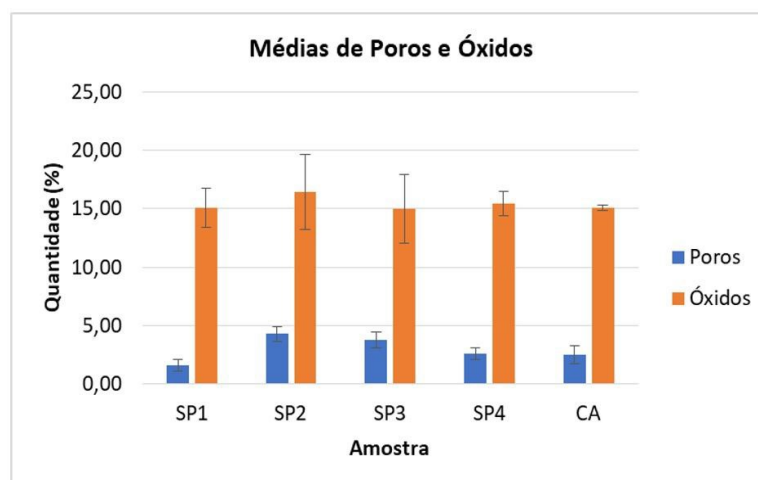


Figura 6. Teores de poros e óxidos nas amostras tratadas com *shot peening* e no estado como aspergido.

Na avaliação da dureza, a distribuição das identificações se deu de forma semelhante àquela já mencionada anteriormente, porém, neste caso, com dez perfis de três medidas nas seções transversais de cada amostra. 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” (próxima à superfície), “Central” e “Inferior” (próxima à interface com o substrato).

No gráfico da Figura 7 são plotadas as durezas médias para cada posição e os respectivos desvios padrão. 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*. Desta forma, não se pode afirmar que o tal tratamento superficial tenha gerado encruamento em nível significativo, independentemente dos parâmetros de processo adotados.

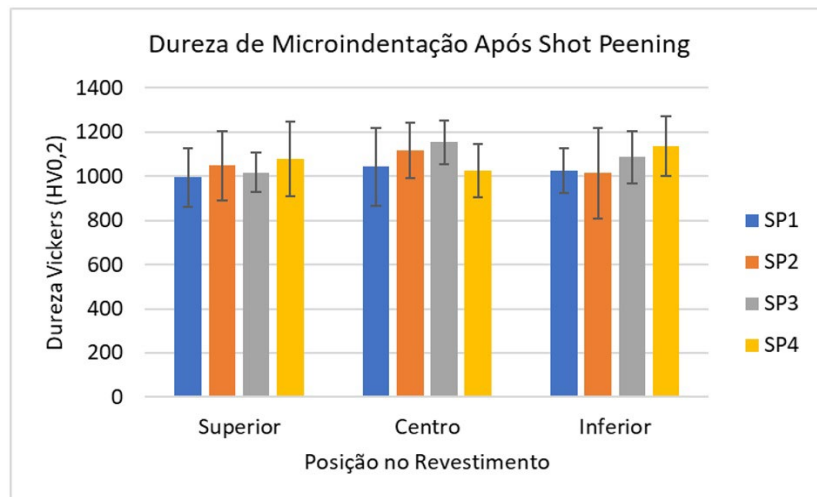


Figura 7. Dureza de microindentação nas amostras tratadas com *shot peening*.

3.2. Ensaio de erosão

3.2.1. Revestimento “como aspergido”

A Figura 8 exibe a curva de perda de massa acumulada, em mg, ao longo dos 4 minutos de ensaio sobre o revestimento em seu estado original, sem tratamento. Percebe-se maior inclinação da curva no primeiro minuto de ensaio. O desgaste acentuado nos instantes iniciais fica mais perceptível quando se observa o gráfico da Figura 9, que apresenta a taxa de erosão, em “mg/min”, para cada minuto de ensaio. Os valores deste gráfico foram obtidos a partir da divisão da perda de massa acumulada em um determinado instante, pelo tempo total decorrido (em minutos) até aquele momento.

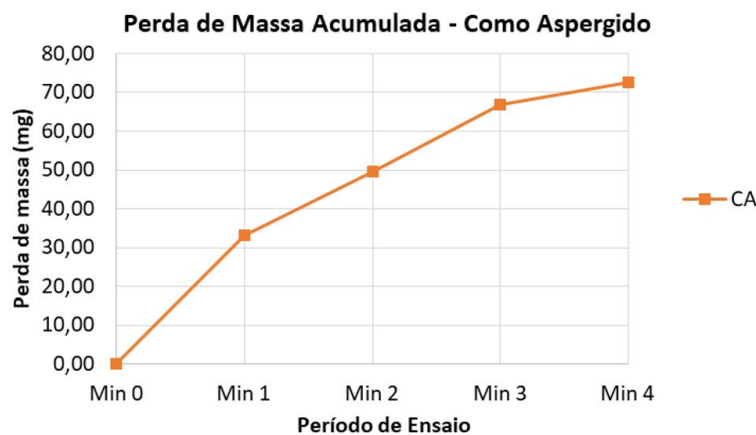


Figura 8. Perda de massa acumulada no revestimento como aspergido.

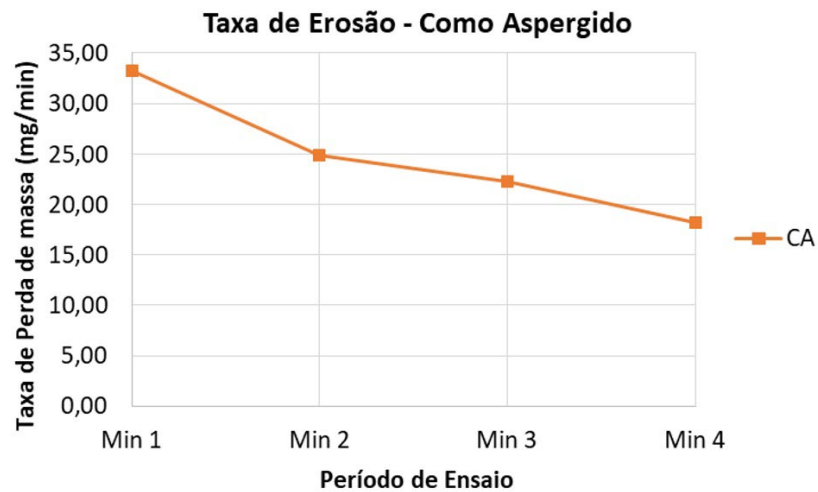


Figura 9. Curva de taxa de erosão a cada minuto de ensaio da amostra no estado como aspergido.

A Figura 10 exibe imagens obtidas em MEV da superfície do revestimento 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. Observa-se também a presença de trincas, como já verificado nas seções transversais.

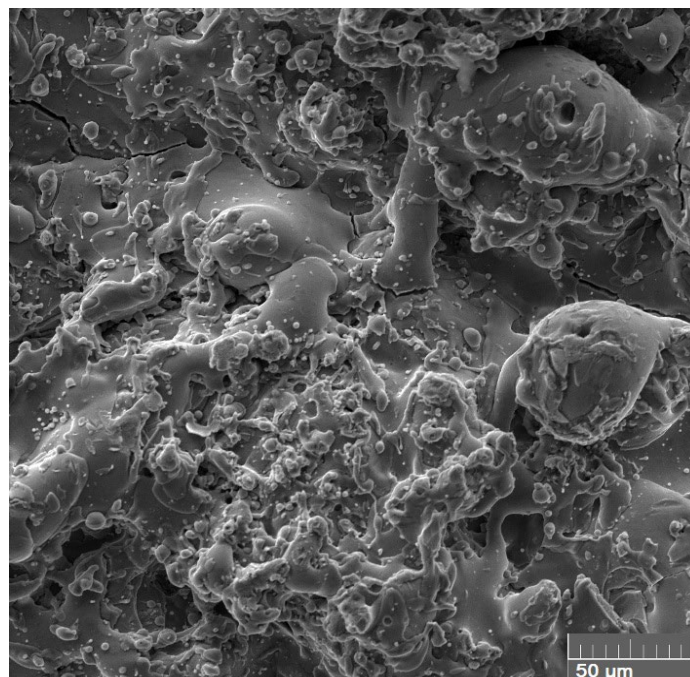


Figura 10. Aspecto superficial do revestimento como aspergido, antes do ensaio de erosão.

O aspecto microscópico da superfície após os 4 minutos de ensaio é exposto na Figura 11. São presentes marcas de microcorte e microsulcamento, comuns aos processos de desgaste, em especial quando se trata de materiais de maior ductilidade, sendo citadas por vários autores [10,18,20,21]. Porém, 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.

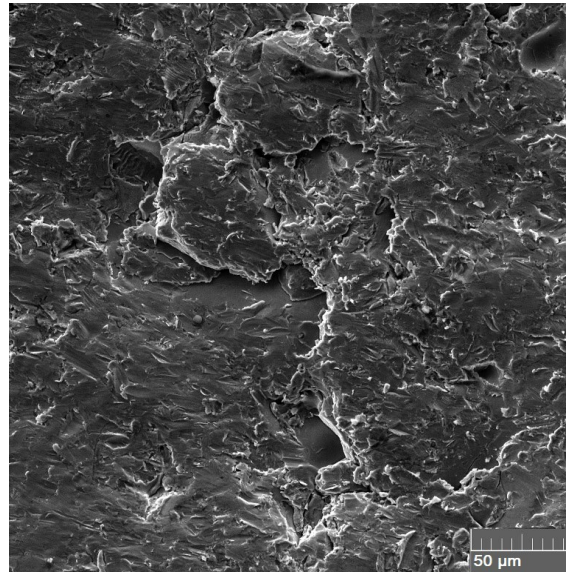


Figura 11. Detalhe da região desgastada no revestimento como aspergido, após 4 minutos de ensaio de erosão por jato de lama (escala – 50 μm).

Os mecanismos de desgaste seguem o esperado para materiais brutos [4,5,20,22]. 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 nos resultados dos ensaios de desgaste. Ainda, as trincas formadas neste revestimento ainda durante a deposição contribuem para um desgaste mais acelerado.

3.2.2. Revestimentos lixado e polido

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 na resistência ao desgaste no revestimento tratado, se a redução na taxa de desgaste compensa o material perdido no tratamento.

A Figura 12 exibe as curvas de perda de massa acumulada para os dois casos estudados neste tópico: revestimento apenas lixado e completamente polido, além daquela já exibida, do revestimento no estado como aspergido, para comparação. Neste caso sem considerar a perda gerada no tratamento em si. Percebe-se melhor resultado para o revestimento apenas lixado, sendo que, em comparação ao estado como aspergido, ambos os tratamentos reduziram a perda total de massa.

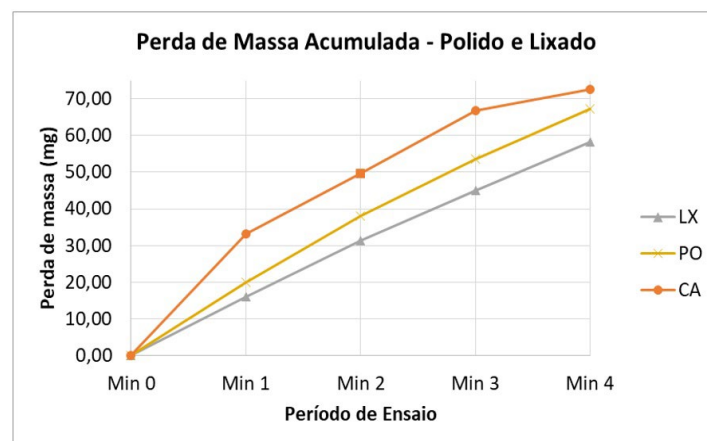


Figura 12. Curvas de perda de massa acumulada nos revestimentos lixado e polido.

O comportamento da taxa de erosão por minuto de ensaio é exibido na Figura 13. Aqui se percebe que tanto o lixamento como o polimento estabilizam a taxa de desgaste ao longo de todo o período de ensaio, sendo que a amostra polida manteve com erosão ligeiramente superior à apenas lixada.

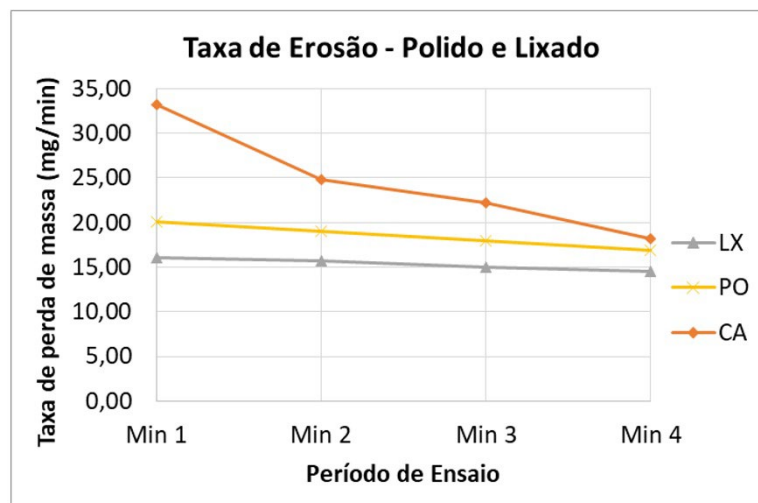


Figura 13. Variação da taxa de erosão a cada minuto de ensaio nas amostras lixadas e polidas.

As análises das superfícies erodidas em MEV, após os 4 minutos de ensaio, reforçam que não há alteração nos mecanismos de desgaste após os instantes iniciais do ensaio. Na Figura 14, observam-se os mesmos aspectos já verificados nas superfícies ensaiadas dos revestimentos como aspergidos, com trincas e marcas de fratura frágil nas interfaces entre lamelas. Isso indica que a remoção de material se dá pelo trincamento e destacamento de frações de poucos micrometros do revestimento, como as indicadas pelas setas nas imagens.

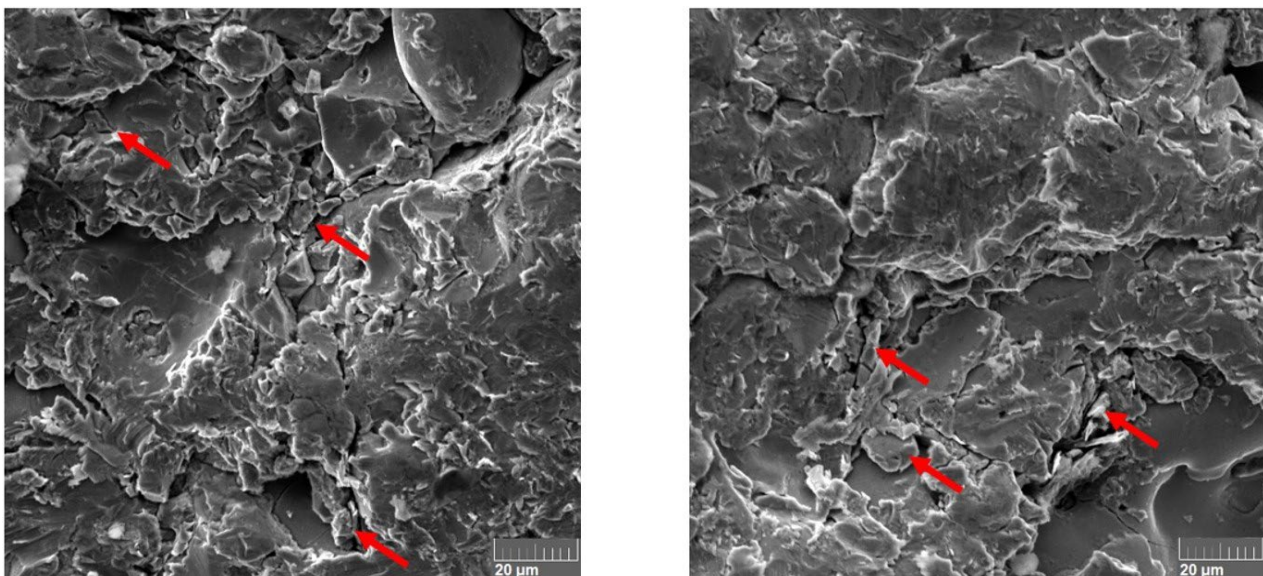


Figura 14. Aspecto das superfícies erodidas nas amostras lixada (esquerda) e polida (direita).

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.

A Figura 15 exibe novamente as curvas de perda de massa acumulada, porém agora considerando também a variação causada pelo próprio tratamento superficial. Também, é inserida no mesmo gráfico a curva referente ao revestimento 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.

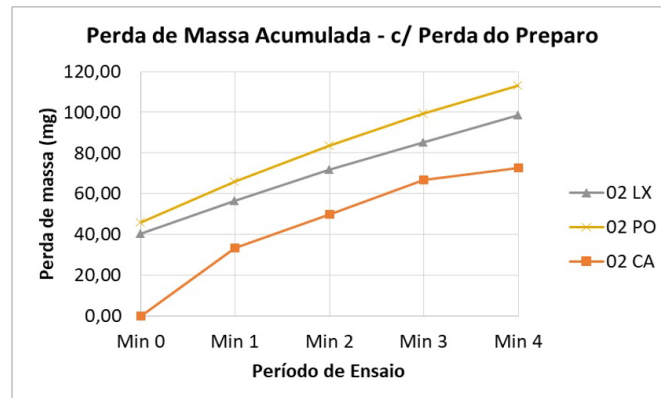


Figura 15. Perda de massa acumulada nos revestimentos lixado e polido considerando perda pelo tratamento superficial e comparação com revestimento como aspergido.

3.2.3. Revestimentos tratados com shot peening

A aplicação do *shot peening* reduziu a resistência à erosão do revestimento, conforme se observa na Figura 16, o qual desconsidera a perda de massa gerada em função do próprio processo de tratamento. Apenas a amostra SP1 apresentou uma melhora, especificamente no primeiro minuto de ensaio, conforme se verifica também na Figura 17, 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.

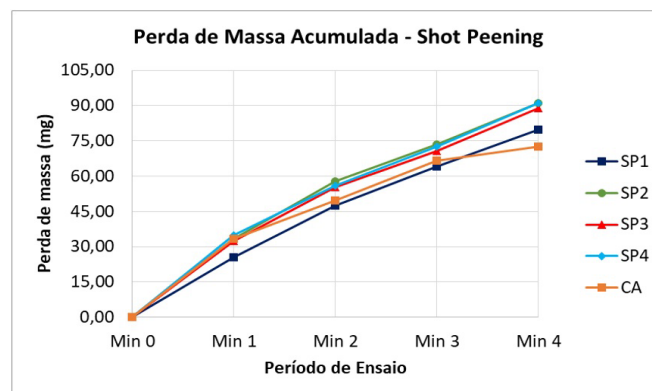


Figura 16. Perda de massa acumulada nos ensaios de erosão dos revestimentos tratados com *shot peening*.

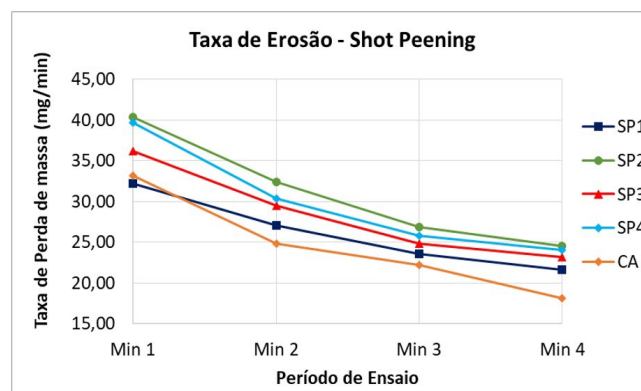


Figura 17. Variação das taxas de erosão a cada minuto de ensaio nas amostras tratadas com *shot peening*.

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 na Figura 18.

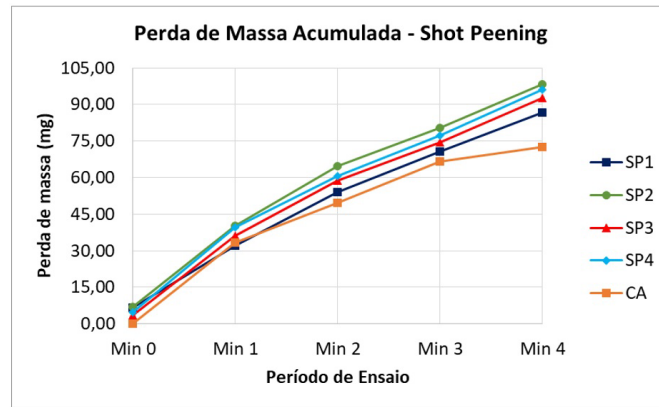


Figura 18. Perda de massa acumulada nas amostras com *shot peening* considerando perda causada pelo tratamento (minuto zero).

Analisando as imagens das superfícies dos revestimentos após a aplicação do *shot peening*, Figura 19, percebe-se que o jateamento removeu partículas de baixa aderência, 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, facilitando o desprendimento de material durante o ensaio de erosão.

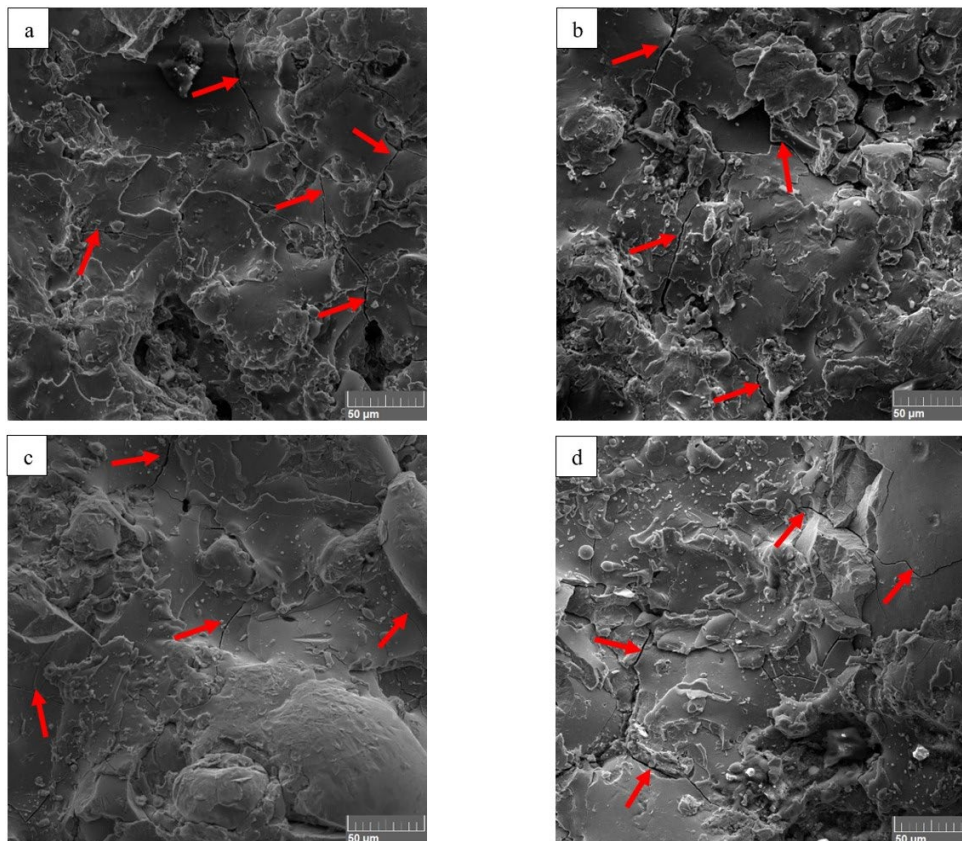


Figura 19. Superfícies dos revestimentos após processo de *shot peening*. (a) Amostra SP1; (b) Amostra SP2; (c) Amostra SP3; (d) Amostra SP4. As setas indicam as trincas nos revestimentos

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 [23,24].

A Figura 20 exibe a alteração nas características de porosidade, teor de óxidos, dureza e resistência à erosão por jato de lama (perda de massa acumulada) do revestimento em estudo, em função da alteração dos parâmetros de *shot peening* – do diâmetro de esfera, ângulo de jateamento e distância de jateamento.

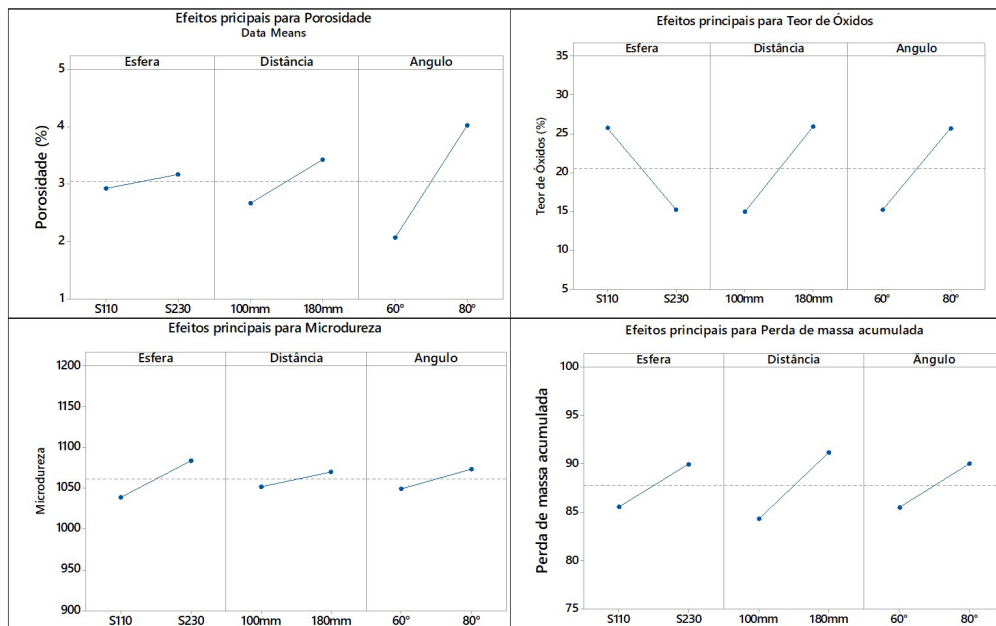


Figura 20. Influência dos parâmetros de *shot peening* nas características e comportamentos do revestimento.

Assim como já observado quando das análises individuais de morfologia, dureza e ensaio de erosão, a aplicação do *shot peening* sobre o revestimento 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 ângulo de jateamento.

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 ângulo de jateamento.

4. 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 aspersão térmica a arco elétrico tendem a se comportar de maneira similar ao esperado para o material no estado bruto. Foram verificados mecanismos de erosão já conhecidos, sendo predominantes os mecanismos frágeis, onde ocorre a formação e crescimento de trincas e destacamento de seções microscópicas do revestimento;
- As maiores taxas de erosão se dão no primeiro minuto de ensaio. A presença de partículas de baixa aderência, como salpicos, na superfície do revestimento tem influência direta neste comportamento. Os tratamentos, em especial o lixamento e polimento, removem previamente essas partículas, reduzindo assim a erosão nos primeiros minutos de ensaio;
- Tanto o lixamento quanto o polimento completo do revestimento, levam a uma redução da taxa de desgaste 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 a camada aspergida gerou alterações quase que insignificantes às morfologias e desempenhos à erosão, inclusive com piora na resistência ao desgaste erosivo, possivelmente em função do aumento do número de trincas na camada depositada.

Contribuição dos autores

AC: investigação, conceitualização, redação-rascunho original; RSCP: supervisão, conceitualização, validação; GBS: análise formal, metodologia; AGMP: metodologia, validação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec, à UTFPR-PG (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa) e à UFPR (Universidade Federal do Paraná) pelo suporte e disponibilidade de materiais e laboratórios necessários para o estudo.

Referências

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [página da internet]. Matriz por origem de combustível. 2021 [acesso em 20 fev. 2021]. Disponível em: <https://bitly.com/ObWtP>
- [2] Moura AP, Moura AAF, Rocha EP. Engenharia de sistemas de potência: geração hidroelétrica e eolioelétrica. Fortaleza: Edições UFC; 2019.
- [3] Muller, G. M.. Despacho de máquinas e geração de usina hidrelétrica individualizada utilizando algoritmos genéticos [dissertação]. Rio de Janeiro: Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2010.
- [4] Hutchings I, Shipway P. Tribology: friction and wear of engineering materials. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2017.
- [5] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*. 1960;3(2):87-103. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7).
- [6] Vaz RF, Sucharski GB, Chicoski A, Siqueira IBAF, Tristante R, Pukasiewicz AGM. Comparison of FeMnCrSi Cavitation resistance coatings deposited by twin-wire electric arc and high-velocity oxy-fuel processes. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021;30(3):754-771. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01145-z>.
- [7] Mayer AR, Bertuol K, Siqueira IBAF, Chicoski A, Váz RF, Sousa MJ, et al. Evaluation of cavitation/corrosion synergy of the Cr3C2-25NiCr coating deposited by HVOF process. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;69:105271-105280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105271>. PMID:32738453.
- [8] Bertuol K. Estudo do efeito sinérgico cavitação/erosão em revestimentos de carboneto de cromo e tungstênio depositados por aspersão térmica de alta velocidade [dissertação]. Ponta Grossa: Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2020.
- [9] Pukasiewicz AGM, Capra AR, Vaz RF. Cavitation resistance of asp coatings, ultrasonic testings and francis runner field performance comparison. In: *Proceedings of the 13th Materials Science and Technology (MS&T); 2013; Montreal*. New York: Curran Associates; 2013. p. 799-805.
- [10] Grewal H, Arora H, Agrawal A, Singh H, Mukherjee S. Slurry erosion of thermal spray coatings: effect of sand concentration. *Procedia Engineering*. 2013;68:484-490. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.210>.
- [11] Santa JF, Espitia LA, Blanco JA, Romo SA, Toro A. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*. 2009;267(1-4):160-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.018>.
- [12] Sucharski GB. 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 [tese]. Curitiba: Curso de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná; 2016.
- [13] Oerlikon Metco. Material product data sheet: iron-based, high chromium (Cr > 20%) thermal spray wires. 2015.
- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM G73-10: standard test method for liquid impingement erosion using rotating apparatus. West Conshohocken: ASTM International; 2017 [acesso em 20 fev. 2021]. Disponível em: www.astm.org
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM E2109-01: standard test methods for determining area percentage porosity in thermal sprayed coatings. West Conshohocken: ASTM International; 2014.
- [16] 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*. 2021;30(4):959-967. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01138-y>.
- [17] Yury K, Filippov M, Makarov A, Malygina I, Soboleva N, Fantozzi D, et al. Arc-sprayed Fe-based coatings from cored wires for wear and corrosion protection in power engineering. *Coatings*. 2018;8(2):71. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings8020071>.
- [18] Santa JF, Baena JC, Toro A. Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery. *Wear*. 2007;263(1-6):258-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.061>.
- [19] Lima CRC, Libardi R, Camargo F, Fals HC, Ferraresi VA. 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*. 2014;23(7):1059-9630. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.
- [20] Javaheri V, Porter D, Kuokkala V. Slurry erosion of steel: review of tests, mechanisms and materials. *Wear*. 2018;408-409:248-273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.010>.
- [21] More SR, Bhatt DV, Menghani JV. Study of the parametric performance of solid particle erosion wear under the slurry pot test rig. *Tribology in Industry*. 2017;39(4):471-481. <http://dx.doi.org/10.24874/ti.2017.39.04.06>.

- [22] Wang Y, Yang Z. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*. 2008;265(5-6):871-878.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.014>.
- [23] Taguchi G. *Engenharia da qualidade em sistemas de produção*. São Paulo: McGraw-Hill; 1990.
- [24] Roy RK. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. New York: John Wiley & Sons; 2001.