

ABRASIVE WEAR RESISTANCE EVALUATION OF A SA-649/SA-649M STEEL COATED WITH WC-CO BY HVOF¹

*Irionson Antonio Bassani*²
*Ricardo Diego Torres*³
*Gustavo Brandão Andrusko*⁴

Resumo

Rolos corrugadores usados em indústrias de papel são manufacturados a partir do aço ASME SA-649/SA-649M. A fim de resistir as condições de elevado desgaste abrasivo e corrosão, os rolos são recobertos com uma camada de 88% de carbeto de tungstênio e 12% de cobalto com o processo de aspersão térmica por plasma a alta velocidade HVOF. Neste trabalho são analisadas a influência de variáveis usadas no processo como a velocidade angular do rolo, a velocidade de translação da pistola, a espessura da camada depositada e a pressão da câmara de combustão. As propriedades mecânicas dureza, desgaste abrasivo, rugosidade e porosidade são analisadas, mostrando sua dependência com os parâmetros do processo. Os resultados demonstram que uma maior pressão na câmara de combustão influencia positivamente na qualidade da camada final obtida. A velocidade de translação da pistola não apresenta influencia na resistência da camada ao desgaste. Os resultados obtidos com o aumento da rotação mostraram as piores propriedades da camada.

Palavras-chave: Carbeto de tungstênio; Aspersão térmica por plasma a alta velocidade; Rolos corrugadores; Resistência ao desgaste abrasivo.

ABRASIVE WEAR RESISTANCE EVALUATION OF A SA-649/SA-649M STEEL COATED WITH WC-CO BY HVOF

Abstract

Corrugating rolls used at corrugated boards industries are made of ASME SA-649/SA-649M steel. In order to resist the high abrasive wear and corrosion conditions the rolls are coated with an 88% tungsten carbide and 12% cobalt layer with the high velocity oxi-fuel process HVOF. In this work the influence of variables like the roll angular speed, gun translation velocity, layer thickness and combustion pressure at the gun chamber used as process variables are investigated. The mechanical coating properties hardness, abrasive wear resistance, roughness and porosity are analyzed, showing its dependence on the basic process parameters. The results demonstrate that higher combustion pressure at the gun chamber had influenced in a positive way to get better final coating quality. The gun translation velocity has no influence on the coating wear resistance. The results of increasing speed rotation showed the worst coating properties.

Key words: Tungsten carbide; High Velocity Plasma Thermal Spraying; Corrugating rolls; Abrasive wear resistance.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Professor Dr.-Ing., PUCPR, Curitiba, PR, irionson.bassani@pucpr.br.*

³ *Professor PhD., PUCPR, Curitiba, PR, irionson.bassani@pucpr.br.*

⁴ *Engenheiro, BHS Corrugated, Curitiba, PR, gustavoandrusko@bhs-corrugated.com.br.*

1 INTRODUÇÃO

A degradação do material de rolos de laminação de papel deve-se principalmente à fadiga de contato ou ao desgaste abrasivo, dependendo se o processo de produção é de papel plano ou corrugado. A degradação por corrosão está sempre presente devido à condição agressiva inerente do meio.

Devido a isto, os materiais de construção para rolos laminadores evoluíram da utilização de materiais maciços, passou pelo seu tratamento térmico, evoluindo até a deposição eletrolítica de camadas de cromo duro. O processo eletrolítico tornou-se indesejável devido principalmente aos efeitos danosos à saúde humana, causado pelo ácido crômico, e à excessiva densidade de microtrincas, causada pelas elevadas tensões residuais trativas inerentes ao processo.^(1, 2)

A intensiva pesquisa considerando a resistência ao desgaste, dureza superficial elevada e um baixo coeficiente de atrito em diferentes condições corrosivas levaram ao uso intensivo de camadas aspergidas termicamente. A principal vantagem da deposição de camadas é a escolha independente das propriedades dos materiais da superfície e do substrato.^(3- 5)

Dos materiais utilizados na aplicação de camadas revestidas tornou-se comum o uso de carbeto de tungstênio imersos em uma matriz de cobalto (WC-Co). Para sua aplicação utilizam-se tipicamente os processos de aspersão térmica que utilizam plasma, seja atmosférico (Atmospheric Plasma Spray APS) ou a alta velocidade (High Velocity Oxyfuel Flame Spray HVOF). Cada método de aspersão possui características próprias, por exemplo, diferentes temperaturas de chama e velocidades de partículas aspergidas.

Para aumentar a vida útil de rolos laminadores de papel plano ou corrugadores de papel corrugado adotam-se hoje camadas depositadas a partir de WC-Co, aspergidas pelo processo HVOF. Comparado aos processos alternativos utilizados anteriormente, estes revestimentos apresentam melhores propriedades mecânicas como dureza e resistência ao desgaste abrasivo da superfície.

O principal parâmetro que influencia o desempenho da camada aspergida é o compósito sinterizado de WC-Co. Estes materiais mostraram um aumento significativo na resistência ao desgaste à medida que a dureza do carbo ultrapassa um patamar correspondente ao tamanho de partículas embebidas padrão (1,2 μm), para fino (0,8 μm) ou ultrafino (0,5 μm).⁽⁶⁻¹⁰⁾

Também o tamanho da partícula utilizada, bem como a fração volumétrica, controla a distância média que separa os carbeto através da matriz de cobalto. Para uma fração constante de cobalto, a sua resistência ao desgaste aumenta, à medida que tanto o tamanho da partícula de carbo quanto a distância média diminuem. Isto resulta numa melhoria de propriedades devido ao maior impedimento da deformação, ao aumento da dureza e a tendência de reduzir a extrusão da matriz de cobalto.⁽¹¹⁾

Além disto, o fenômeno de desgaste durante o processo de laminação ou corrugamento do papel é importante. A vida útil de rolos planos ou corrugados depende principalmente do desgaste por fadiga de contato e por abrasão. A fadiga de contato depende de um mecanismo de dano que ocorre por períodos de iniciação e propagação de microtrincas, evoluindo para macrotrincas e ulterior delaminação do material.⁽¹²⁾

Já o desgaste abrasivo depende dos resíduos sólidos existentes no papel confeccionado. A sílica é um elemento comumente encontrado como impureza extremamente abrasiva, presente em diferentes quantidades e granulometria.

Do processo de deposição resulta a não uniformidade da espessura da camada depositada, diferindo para rolos laminadores em comparação com rolos corrugadores. Em rolos laminadores a camada pode ser obtida facilmente com espessura constante, uma vez que a superfície a ser aspergida é cilíndrica. Já a superfície dos rolos corrugadores é composta de ranhuras longitudinais. Em função da configuração física do dispositivo de aspersão, combinado a geometria do cilindro corrugado e a rotação imposta a este durante a aplicação, ocorre a deposição desigual na superfície do rolo corrugador. Isto implica numa espessura maior na crista e no fundo da ranhura, em comparação com a superfície dos flancos. Para as condições de serviço o fator determinante passa a ser a taxa de desgaste. Esta define a espessura mínima da camada a ser aplicada.

Sendo assim, a vida útil de rolos corrugadores de papel é proporcional à taxa de desgaste por abrasão. Esta por sua vez depende da condição do material de deposição utilizado, do meio abrasivo em que ele desempenha sua atividade e dos parâmetros utilizados para obter as propriedades da camada.

Considerando estes aspectos, o objeto de investigação deste trabalho é verificar o desempenho à abrasão da camada depositada em função do número de passes e das diferentes combinações de parâmetros do processo possíveis. O desempenho é analisado em camadas com partículas sinterizadas de carbeto de tungstênio inseridas numa matriz de cobalto WC-Co, depositadas sobre um substrato de aço SA-649/SA-649M, Classe 1A, Grau 2, com a utilização do processo de aspersão térmica por plasma a alta velocidade HVOF.

São analisadas propriedades como a dureza, a taxa de desgaste, a porosidade e a adesão na interface camada depositada/substrato, em função de parâmetros do processo como pressão de combustão, velocidade de avanço da pistola, rotação das amostras, vazão de material depositado e número de passes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das Amostras

As amostras são planas com dimensões 35x25x10 mm, confeccionadas com o mesmo material utilizado nos rolos corrugadores: aço forjado de ferro carbono-manganês conforme ASTM SA-649/SA-649M, Classe 1A, Grau 2, conforme Figura 1 (a). A análise da composição química resultou em 0,56% C; 0,90% Cr; 0,88% Mn; 0,29% Si; 0,17% Mo; 0,014% P; 0,012% S; 0,0058% Si e < 0,01% W.⁽¹³⁾

Após o corte as amostras foram tratadas termicamente a 960 C em um forno AEG-Elotherm MACHine, modelo UVH-4000/400, seguido de rápido resfriamento em um polímero solúvel em água (Polydur b). A análise por microscopia ótica seguida da determinação da dureza foi empregada para confirmar a microestrutura martensítica temperada de 60 HRC obtida.

Para melhorar a adesão entre a camada e o substrato, as amostras foram desengraxadas e jateadas com esferas de vidro de tamanho entre 212 e 425 µm (70 a 40 mesh) antes da deposição. A rugosidade foi medida com um rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Talysurf Series 2, utilizando-se escala em Ra com 4 *cut off* de 0,8mm. A média geral dos valores de rugosidade antes do ensaio de desgaste foi de (2,12±0,06) µm.

Antes de realizar o jateamento as amostras foram limpas com solvente e sabão neutro. Para a aplicação do revestimento as amostras foram posicionadas e fixadas na periferia de um anel, este preso a um eixo suporte. O dispositivo foi posicionado

entre pontas no barramento da máquina de aplicação do revestimento, conforme mostra a Figura 1 (b).

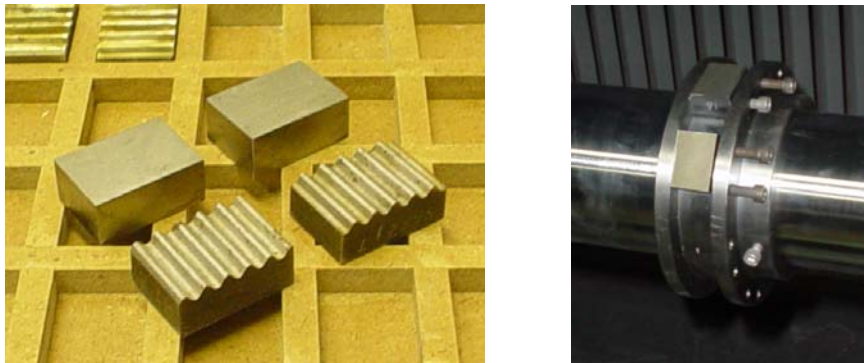


Figura 1. Corpos de provas (a) lisos e corrugados e (b) sua fixação ao suporte.

2.2 Parâmetros do Processo de Aspersão Térmica

O material de deposição, utilizado em forma de pó, possui composição em porcentagem peso de 88% de WC e 12% de Co, com tamanho de partícula na ordem de 25 μm . O equipamento utilizado para a aplicação do WC-Co foi o Tafa JP-5000 HP/HVOH, modelo 5120 e o alimentador de pó empregado da marca *Powder Feed Dynamics*, modelo Mark XV.

Para eliminar a umidade na superfície e diminuir o choque térmico foi realizado um passe de pré-aquecimento entre 80°C à 100°C em todas as amostras.

Para a avaliação e discussão dos resultados por comparação, foi confeccionada uma série padrão utilizando-se os parâmetros e condições de aplicação recomendadas pelo fabricante, variando-se o número de passes para a obtenção da espessura final:

- Série padrão: parâmetros de aplicação conforme recomendação, variação do número de passes (cinco, seis e sete passes)

Para a realização dos testes as amostras foram divididas em cinco séries numeradas de 1 a 5. Foram confeccionadas três amostras por série, exceto a série 5, composta de apenas duas amostras. Para cada série de amostras foram variados os parâmetros do processo em relação aos da amostra padrão conforme segue, mantendo-se os demais parâmetros idênticos aos adotados para as amostras padrão:

- Série 1: velocidade de translação o dobro; número de passes o dobro;
- Série 2: rotação da peça 50% maior; quantidade de passes 50% maior;
- Série 3: velocidade de translação 50% menor; número de passes 50% menor;
- Série 4: quantidade de pó 50% menor; número de passes o dobro;
- Série 5: vazão de querosene 30% menor, igual a 4,7gph (vazão normal é 6,5gph), o que corresponde a pressão na câmara de combustão menor.

A Tabela 1 resume as diferentes combinações de parâmetros adotados para cada série de amostras.

Tabela 1. Parâmetros adotados no processo de deposição e numeração das séries e amostras.

Série	Padrão	1	2	3	4	5
Número das amostras		1,11,20	3,6,12	4,13,19	8,10,18	7,14
Número de passes	5, 6, 7	12	9	3	12	6
Rotação da peça no jato (rpm)	90	90	90	90	90	90
Rotação da peça na aplicação (rpm)	81	81	120	81	81	81
Avanço da pistola no jato (mm/min)	270	270	270	270	270	270
Avanço da pistola (mm/min)	410	820	410	205	410	410
Distância da pistola (mm)	360	360	360	360	360	360
Pressão de combustão câmara (psi)	135	131	132	131	132	120
Pressão de oxigênio (psi)	200	204	204	203	202	197
Pressão de querozene (psi)	195	197	198	197	199	182
Taxa de vazão do pó (g/min)	80	80	80	80	40	80
Temperatura da água (°F)	60/65	63	66	65	63	61

2.2 Desgaste Abrasivo

2.2.1 Material abrasivo e máquina de abrasão

Como o tipo de abrasivo contido no papel possui alta resistência ao desgaste, o ensaio abrasivo foi realizado de acordo com o procedimento A da norma ASTM G65-04. Para tanto foi utilizada uma máquina construída de acordo com esta norma, conforme a Figura 2. A máquina permite que o material abrasivo passe entre a amostra e um disco de borracha. Estes são pressionados por força aplicada através de um braço de alavanca, provocando assim o desgaste abrasivo.

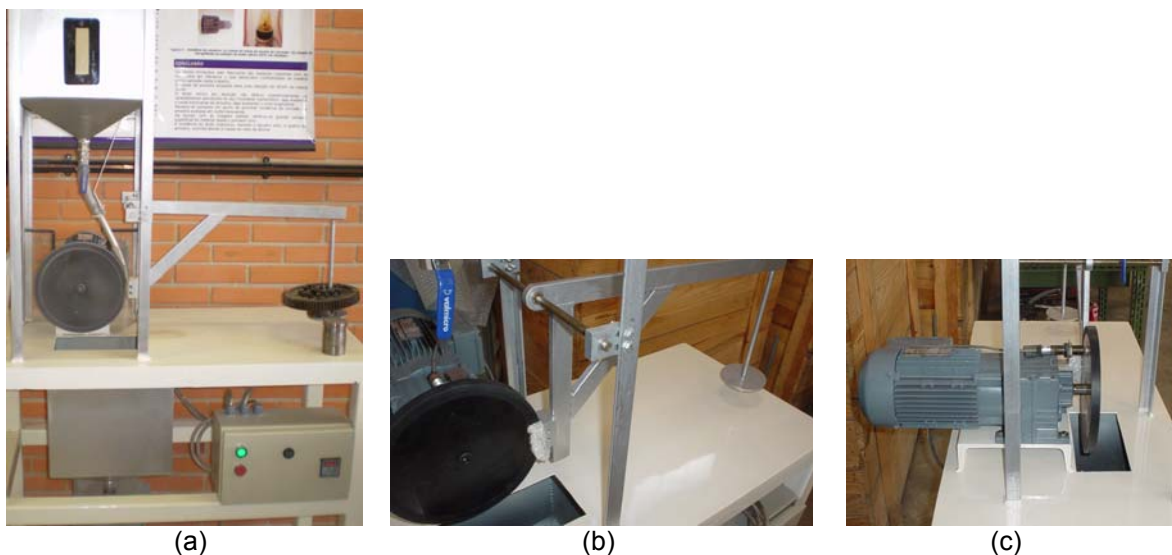


Figura 2. Vista (a) geral da máquina desenvolvida para o ensaio de desgaste, (b) do sistema de aplicação da força de atrito e (c) do sensor de rotação acoplado ao disco recoberto com borracha.

Como material abrasivo foi utilizado areia de praia com umidade máxima de 0,5% de peso, peneirada com até 50 mesh (0,300 mm). O fluxo de material abrasivo é garantido por um bocal de aço inox de geometria definida pela norma, permitindo uma vazão de (200 ± 20) g/min. A cortina de areia formada, uniforme e com escoamento em regime laminar, é direcionada a passar entre o corpo de prova e a roda revestida por borracha. O revestimento de borracha (chlorobutyl) apresentou dureza medida em escala SHORE A de A-60 (aceitável entre A-58 e A-62), efetuada em 0° , 90° , 180° e 270° , garantindo assim o desgaste abrasivo. A carga de 130 N

pré-estabelecida pela norma foi aplicada através de massas suspensas no braço de alavanca. O número de ciclos realizados no ensaio foi de 6000, pré-estabelecido em um quadro de comando elétrico e contado por um sensor de rotação. Um motor-reductor acoplado ao motor elétrico garantiu a rotação de (200 ± 10) rpm. A abrasão linear corresponde a 4.309 m. O tempo do ensaio foi de 30 minutos, com intervalos entre ensaios de 30 minutos ou o tempo suficiente para a borracha do disco voltar à temperatura ambiente.

2.2.2 Determinação da perda de volume por desgaste abrasivo

A perda de massa das amostras foi obtida através da pesagem antes e depois do ensaio de desgaste abrasivo.⁽¹⁴⁾ Foi utilizada uma balança de precisão marca Sartorius, modelo BP221S, com precisão de 0,0001g. Para todas as amostras foram feitos cálculos reportando a perda de volume através da perda de massa utilizando-se a equação [1]:

$$\text{Perda de volume} = \frac{\text{Perda de massa (g)}}{\text{Densidade (g/cm}^3\text{)}} \times 1000 \quad [1]$$

O valor da densidade adotado para o pó empregado no teste, 88% de WC e 12% de Co, foi de $14,2 \text{ g/cm}^3$

2.3 Análise Micrográfica

2.3.1 Preparação das amostras

As amostras com tamanho $5 \times 5 \times 10$ mm foram cortadas pelo processo de eletroerosão a fio em uma máquina marca Charmilles, modelo Robofil 290. As amostras embutidas em termoplástico foram polidas manualmente com pasta diamantada até $1 \mu\text{m}$ em uma máquina politriz marca Struers.

2.3.2 Análise da microdureza Vickers

Todas as amostras foram submetidas à medição de microdureza Vickers antes dos ensaios de desgaste abrasivo. Foram realizadas 5 medições por amostra num microdurômetro marca Shimadzu, modelo 2000, utilizando-se escala Vickers com carga de 300g e duração de 10 segundos.

2.3.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura

A espessura do revestimento, a qualidade de adesão do revestimento ao substrato e a comparação entre a porosidade dos revestimentos foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura marca Shimadzu. Previamente as amostras foram mergulhadas em acetona e limpas por ultrassom por 15 segundos.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

3.1 Perfil da Camada Depositada nas Ranhuras do Cilindro Corrugador

As diferenças na espessura do revestimento ao longo do perfil de um rolo corrugador podem ser observadas na micrografia da Figura 3 (b). Numa escala de 0 a 100%, o raio de topo tem espessura equivalente a 65%, enquanto que o raio do fundo apresenta 100% e o flanco do dente apenas 20%. Em função da configuração física do dispositivo de aspersão, combinado à geometria do cilindro corrugado e a rotação imposta a este durante a aplicação, ocorre a deposição desigual na superfície do rolo corrugador. Isto implica numa espessura maior na crista e no

fundo da ranhura, em comparação com a superfície dos flancos. Para as condições de serviço o determinante é a definição da espessura mínima da camada a ser aplicada em função da taxa de desgaste.

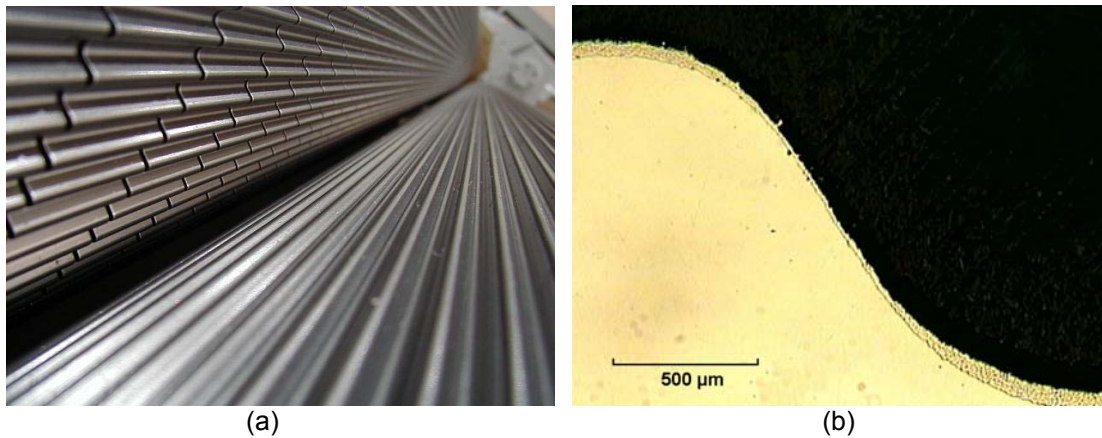


Figura 3. Vista (a) de dois rolos corrugadores e (b) de ranhura com variação do perfil depositado.

3.2 Resultados e avaliação das amostras padrão

Esta avaliação objetiva verificar a influência dos parâmetros na qualidade final da camada depositada, bem como servir de base comparativa para avaliar a influência da variação dos outros parâmetros do processo. A recomendação do fabricante é de que a camada revestida apresente um valor mínimo de dureza de 1100 Vickers, com porosidade menor do que 1%.

Foram efetuados testes padrão a partir de amostras planas com camadas depositadas a partir de cinco, seis e sete passes, Figura 4. Os demais parâmetros foram mantidos constantes e de acordo com a recomendação adotada pelo fabricante dos rolos corrugadores, Tabela 1.

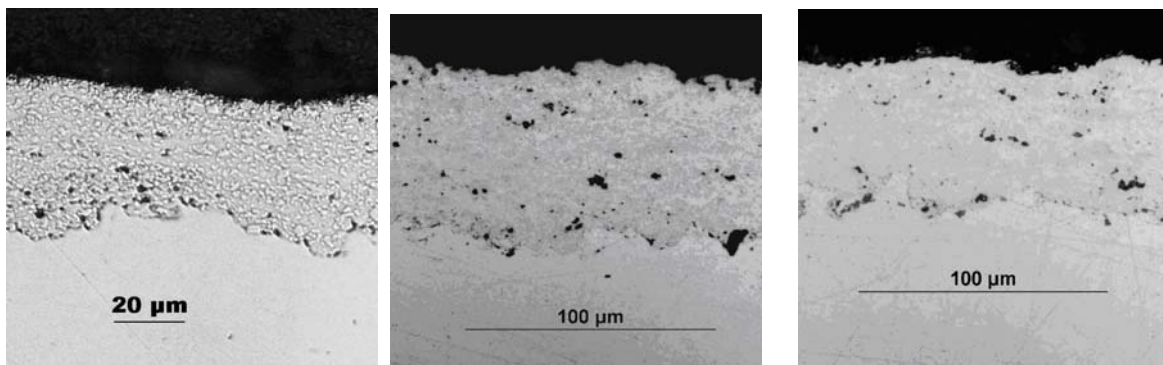


Figura 4. Micrografia do revestimento padrão com (a) cinco, (b) seis e (c) sete passes.

O revestimento de cinco passes resultou em uma camada de espessura de 40 μm , dureza média de 1200 Vickers e porosidade de 1,1%, conforme micrografia da Figura 4 (a). O revestimento de seis passes resultou em uma espessura média de 57 μm , dureza média de 1384 Vickers e 0,7% de porosidade, conforme a Figura 4 (b). O revestimento obtido com sete passes apresentou espessura de 77 μm , dureza média de 1448 Vickers e 0,5% de porosidade, Figura 4 (c). A falta de adesão mostrada nesta figura é o registro de um defeito isolado.

Os parâmetros adotados como padrão resultaram numa camada média de 10 µm de espessura por passe. A dureza das camadas obtidas apresenta valores acima do recomendado, aumentando proporcionalmente com o número de passes. A porosidade da camada obtida com cinco passes é maior do que a recomendação do fabricante, enquanto que, para seis e sete passes, menor. A porosidade diminui com o aumento do número de passes.

3.3 Resultados e Avaliação das Series com Variação de Parâmetros

3.3.1 Avaliação da microdureza Vickers

No gráfico da Figura 5 são apresentados os resultados das medições de microdureza. A ordem das colunas corresponde à ordenação das amostras conforme a Tabela 1.

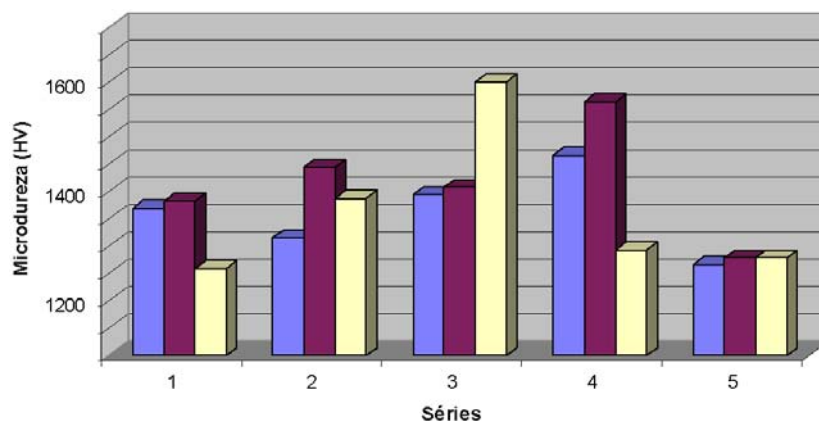


Figura 5. Valores médios de microdureza das amostras divididos em séries com os mesmos parâmetros.

O valor médio de microdureza para todas as amostras foi de (1386 ± 59) Vickers. Todos os valores são maiores que o valor mínimo recomendado de 1100 Vickers. A dispersão de microdureza encontrada para as mesmas séries pode ser causada pela proximidade da indentação a algum poro não aparente, ou até mesmo em diferentes fases do revestimento.

A série de número cinco apresenta os menores valores de microdureza. Esta série foi confeccionada com menor vazão de combustível, o que acarretou uma pressão menor na câmara de combustão. Como consequência a velocidade das partículas foi menor e a energia cinética de impacto também, comprometendo a adesão da camada do revestimento. Para as outras séries a pressão de combustão na câmara da pistola foi mantida igual.

As amostras das séries três e quatro apresentaram os melhores resultados. Uma menor velocidade de translação da pistola aliada a um menor número de passes de revestimento mostrou-se eficaz nos resultados de microdureza da série de número três. Também foi observado que a vazão de pó 50% menor que a padrão, com o dobro do número de passes de revestimento padrão proporcionou bons resultados para a série de número quatro.

A vantagem da série de número três em relação a quatro reside no número de passes: enquanto uma emprega três passes de aplicação do revestimento (equivalente a seis passes devido a velocidade de translação ser a metade), a outra necessita de doze passes; isto representa um consumo de gás e combustível superior para a série quatro.

3.3.2 Análise do ensaio de desgaste

O gráfico da Figura 6 mostra os resultados do ensaio de desgaste efetuado conforme a norma ASTM G65-04.⁽¹⁵⁾

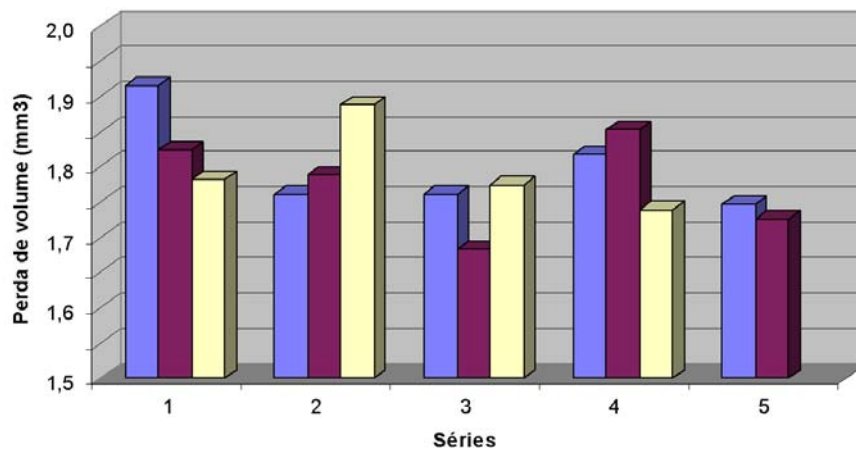


Figura 6. Valores da perda de volume das amostras.

O valor médio da perda de volume por desgaste abrasivo em foi de $(1,79 \pm 0,1035)$ mm^3 . Conforme a norma ASTM G65-04 a perda de volume especificada para o revestimento de WC obtido por aspersão térmica e realizado de acordo com a prática A, deve ser aproximadamente $(2,2 \pm 0,4)$ mm^3 . De acordo com o Gráfico 7 não houve diferenças significativas de perda de volume para as diferentes séries de amostras.

3.3.3 Análise por microscopia eletrônica no MEV

A similaridade entre as microestruturas dos revestimentos considerando a espessura, a porosidade e a adesão do revestimento no substrato foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Enquanto a espessura foi avaliada quantitativamente, a porosidade da camada revestida e sua adesão ao substrato foram analisadas qualitativamente, comparando-se as micrografias das amostras ensaiadas com as dos testes padrão.

Para a análise do resultado de cada série foi utilizada uma amostra representativa, respectivamente as amostras 20, 12, 13, 18 e 14 para as séries 1, 2, 3, 4 e 5.

A Figura 7 refere-se à amostra 20 da série 1. A camada revestida apresenta espessura média de 85 μm . Considerando os doze passes aplicados, a média da espessura de camada aplicada por passe é de 7 μm /passe.

A Figura 7(a) mostra a interface obtida, demonstrando que houve adesão incompleta da camada junto ao substrato. O revestimento é denso e homogêneo, com a presença de poucos poros de tamanho reduzido. A aparência da superfície obtida é melhor do que a da camada revestida padrão, Figura 4. A Figura 7(b) mostra a estrutura da camada depositada. Observam-se falhas de fusão entre as partículas de WC com a matriz de cobalto.

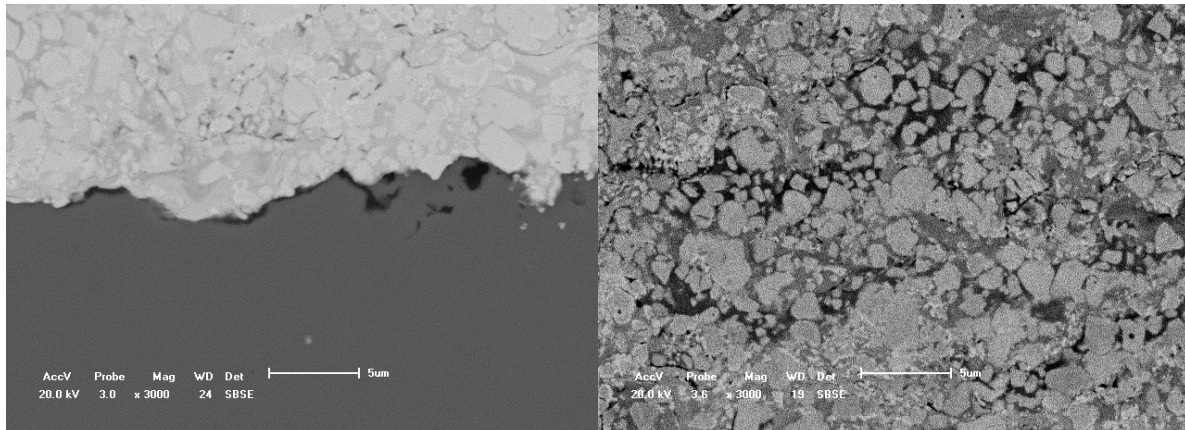


Figura 7. Micrografia (a) da interface e (b) dos camada de revestiemnto da amostra 20

A Figura 8 refere-se à amostra 12 da série 2. A camada de revestimento foi de aproximadamente 113 µm com valor médio da espessura depositada por passe é de 12 µm/passe.

Conforme a Figura 8(a), a micrografia da interface mostra que o aumento da rotação da peça durante aplicação do revestimento resulta em falhas na adesão. A camada depositada apresentou uma composição menos homogênea com a presença de poros de tamanhos aproximados de 2 µm. A Figura 8(b) detalha a estrutura do revestimento aspergido, com os grãos de WC na matriz de cobalto apresentando falhas de adesão e a presença de poros. A camada apresenta-se uniforme, porém não tão densa quando comparada com a amostra 20, conforme Figura 7. O menor tempo de aspersão da camada revestida, devido à rotação ser 50% superior a padrão, implica numa menor qualidade do revestimento.

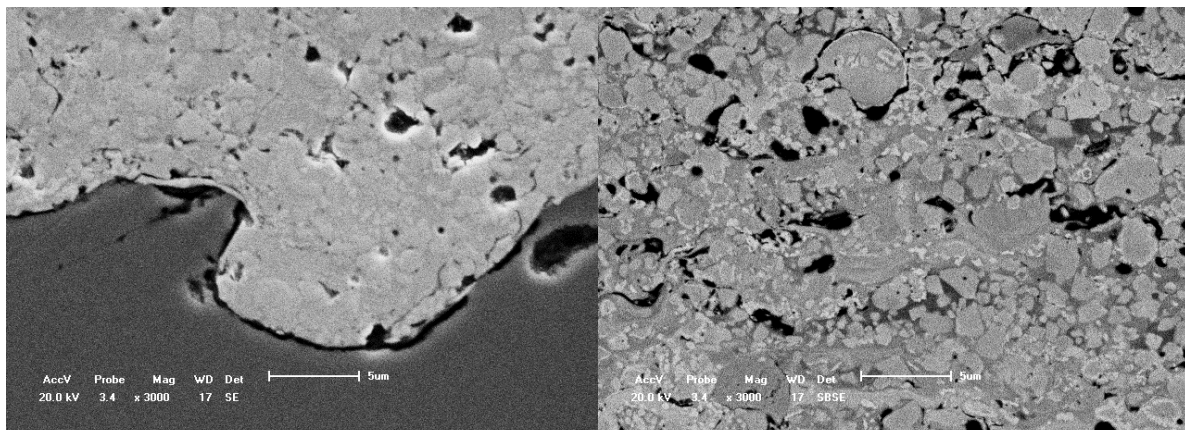


Figura 8. Micrografia (a) da interface e (b) da camada de revestimento da Amostra 12.

A Figura 9 refere-se à amostra 13 da série 3. A espessura da camada depositada foi de aproximadamente 75 µm, resultando na média da espessura de camada aplicada por passe de 25 µm.

A Figura 9(a) mostra a interface com adesão uniforme e com poucas falhas. O depósito apresenta uma composição homogênea praticamente livre da presença de poros. Conforme a Figura 9(b) pode-se observar que as partículas de WC na matriz de cobalto não apresentam defeitos. A camada é densa e homogênea.

Comparando-se as micrografias desta amostra com as encontradas para as amostras padrão, Figura 4, e as amostras da serie 1 e 2, percebe-se a qualidade superior. A porosidade restringe-se a pouca densidade de pequenos poros.

A velocidade de translação menor resulta numa maior quantidade de pó aspergido por unidade de área e por passe, conferindo maior força compressiva entre as partículas durante o impacto e solidificação do revestimento.

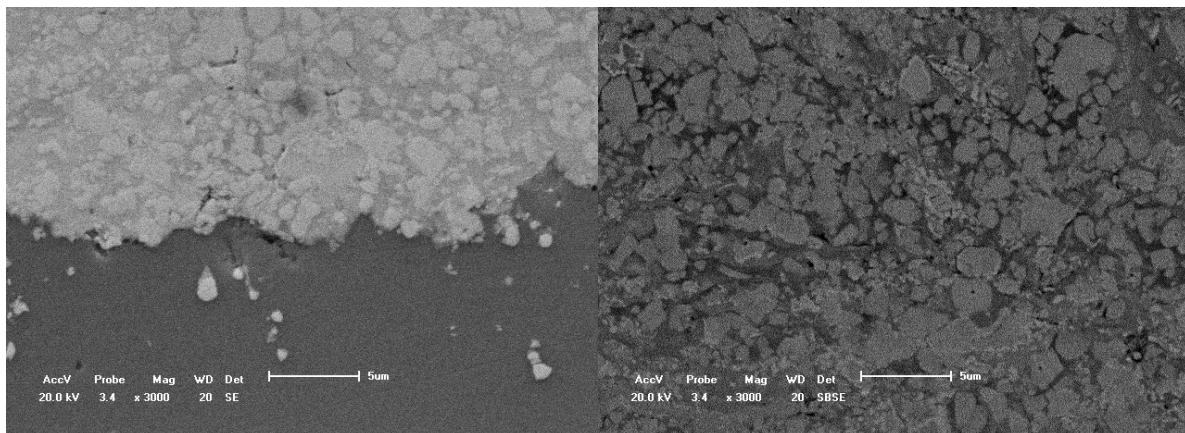


Figura 9. Micrografia (a) da interface e (b) da camada de revestimento da Amostra 13.

A Figura 10 refere-se à amostra 18 da série 4. A espessura de camada de revestimento apresentou aproximadamente 77 µm, resultando uma espessura média por passe de 6 µm/passe.

A amostra apresenta-se uniforme e densa, semelhante à amostra 13 conforme Figura 9. A boa qualidade final desta série é uma alternativa à série três. A micrografia conforme a Figura 10(a) mostra que houve uma boa adesão da camada depositada ao substrato, com poucas falhas aparentes. A Figura 10(b) mostra que a camada depositada apresenta uma composição homogênea com pouca quantidade de pequenos poros. As partículas de WC na matriz de cobalto apresentam-se unidas com a matriz.

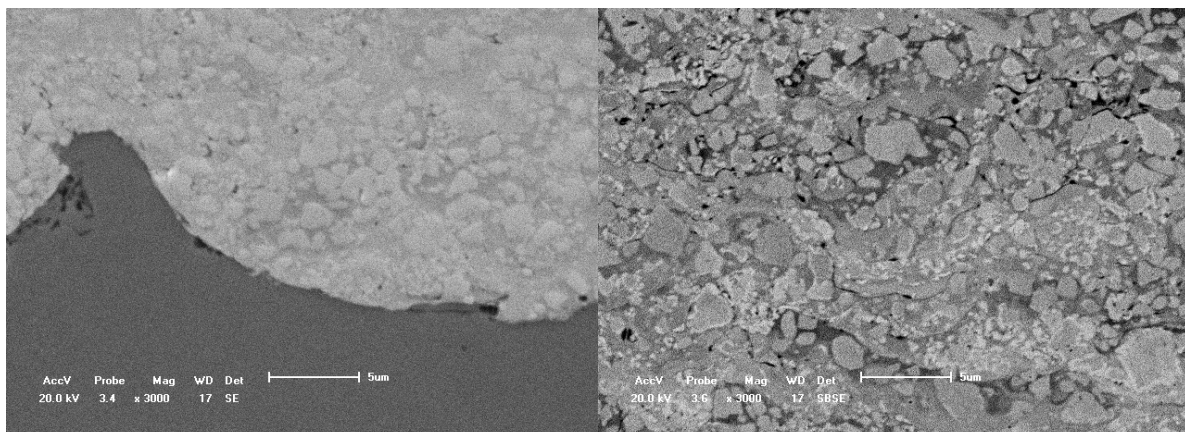


Figura 10. Micrografia (a) da interface e (b) da camada de revestimento da Amostra 18.

A Figura 11 refere-se à amostra 14 da série 5. A espessura obtida foi de aproximadamente 73 µm, resultando uma espessura média de camada por passe de 12 µm/passe. A Figura 11(a) mostra a falta de adesão da camada revestida junto ao substrato e a Figura 11(b) a porosidade da camada, resultando no comprometimento da qualidade final do revestimento. A análise confirma que esta é a pior combinação de variáveis adotadas para a realização do revestimento. A pressão de combustão menor resultou numa qualidade inferior da camada, quando comparada à qualidade padrão para as demais variáveis idênticas. A elevada porosidade e a baixa adesão

são problemas ao longo de todo o filme. Isto confirma o conhecimento solidificado de que, quanto maior a pressão na câmara de combustão, melhor são as propriedades mecânicas finais da camada revestida.

A elevada porosidade e a falta de adesão são fatores preponderantes para a maior susceptibilidade do substrato a corrosão. Além disto, os poros são pontos de concentração de tensões, servindo como pontos propagadores de trincas. Em serviço, ambos aceleram o processo de desgaste do revestimento.

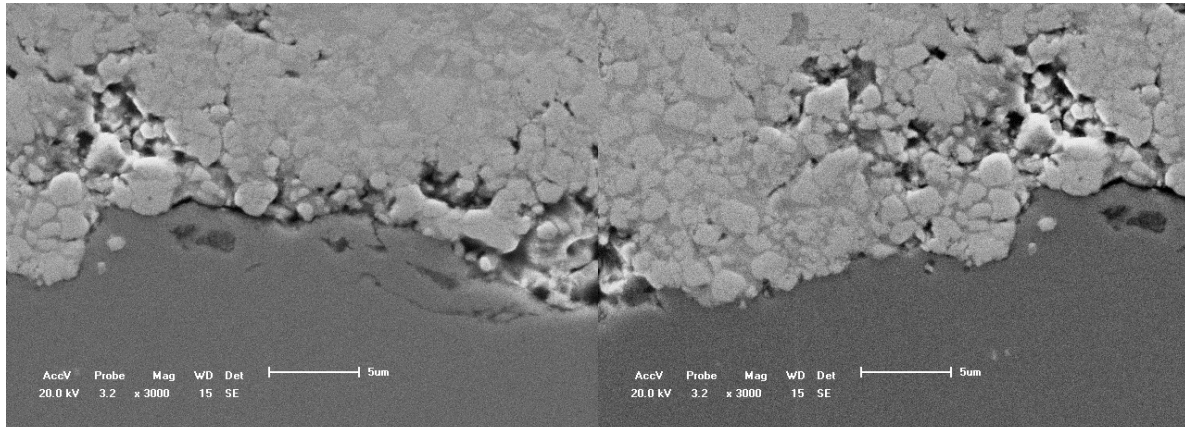


Figura 11. Micrografia (a) da interface e (b) da camada de revestimento da Amostra 14.

4 CONCLUSÕES

Em função da configuração física do dispositivo de aspersão, combinado à geometria do cilindro corrugado e a rotação imposta a este durante a aplicação, ocorre uma espessura de deposição desigual na superfície do rolo corrugador. Isto implica numa espessura maior na crista e no fundo da ranhura, em comparação com a superfície dos flancos. Para as condições de serviço o determinante é a definição da espessura mínima da camada a ser aplicada em função da taxa de desgaste.

A análise das amostras do padrão mostra que uma maior dureza do revestimento está relacionada com uma menor quantidade de poros presentes na camada.

Os melhores resultados de microdureza foram obtidos para a combinação de parâmetros “metade da velocidade de translação da pistola aliada à metade do número de passes” e “metade da vazão de pó e o dobro do número de passes” relativos a amostra padrão de seis passes. No entanto, a primeira combinação de parâmetros representa um consumo de gás e combustível inferior à segunda.

A pressão na câmara de combustão da pistola tem papel decisivo na qualidade final do filme. Uma menor pressão produz uma camada revestida com menor dureza e maior porosidade uma vez que a velocidade de aspersão também diminui.

Pode-se concluir que o aumento da rotação do substrato afetou negativamente a qualidade final do revestimento, prejudicando a adesão junto ao substrato e aumentando a quantidade e o tamanho dos poros presentes.

A velocidade de translação da pistola mostrou-se pouco influente na qualidade final da camada revestida quando combinada com o número de passes. Nas duas séries de amostras em que foram alteradas as velocidades, o revestimento apresentou-se denso e homogêneo.

A diminuição da vazão do pó de WC-Co em 50% combinado com o aumento do número de passes, não influenciou a qualidade final do revestimento.

REFERÊNCIAS

- 1 Kuo, H.W.; Lai, J.S.; Lin, T.I. Nasal septum lesions and lung function in workers exposed to chromic acid in electroplating factories, Springer Verlag, n. 70, 1997, pp. 272-276.
- 2 Jones, A.R. Microcracks in hard chromium electrodeposits, *Plating and Surface Finishing*, april 1989, pp. 62-66.
- 3 Bolles, D C. HVOF thermal spraying: an aternative to hard chrome plating, *Welding Journal*, october 1995, pp. 31-34.
- 4 Bodger, B.E.; McGrann, R.T.R.; Somerville, D.A. The evaluation of tungsten carbide thermal spray coatings as replacement for electrodeposited chrome plating on aircraft landing gear, *Plating and Surface Finishing*, september 1997, pp. 28-31.
- 5 Schwetzke, R.; Kreye, H. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various HVOF spray systems, in: C. Coddet(Ed.), *Thermal Spray: Meeting the challenges of the 21st century*, ASM Int., Materials Park, OH, USA, 1998, pp. 187-192.
- 6 Allen, C.; Sheen, M.; Williams, J.; Pugsley, V.A. The wear of ultrafine WC-Co Hard metals. *Wear* 250 (604-610) 2001.
- 7 D.G.F. O'Quigley,
- 8 K. Jia,
- 9 B.H. Kear,
- 10 L.E. McCandlish,
- 11 Shipway, H.; McCartney, D.G.; Sudaprasert, T. Sliding behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings, *Wear* 259 (2005) 820-827.
- 12 Nieminem, R.; Vuoristo, P.; Niemi, K.; Mäntyla, T.; Barbezat, G. Rolling contact fatigue failure mechanisms in plasma and HVOF sprayed WC-Co coatings, *Wear* 212(1997) 66-77.
- 13 American Society of Mechanical Engineers. Specification for forged steel rolls used for corugating paper machinery SA-649/SA-649M. In: *Asme boiler and pressure vessel code. V. 2A*. New York. 2001. Addenda 2003. p. 1114-1118.
- 14 LIMA, C.R.C.; CAMARGO, F. Estudo e caracterização de revestimentos para desgaste aplicados por aspensão térmica à chama oxicomustível de alta velocidade - HVOF. In: *1º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação*. 2001, Curitiba. p. 1-9
- 15 American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus - ASTM G65-04. p. 1-12, 2004.