

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DE NbMo DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Isabela Fernanda Rocha Corrêa, isabelacorrea@ufpr.br¹
Sarah Anabele Silva, sarah.anabele@ufpr.br¹
Gustavo Bavaresco Sucharski, gustavobavaresco@gmail.com¹
Ramón Cortés Paredes, ramon@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, S/N, Curitiba PR.

Resumo. Algumas aplicações industriais exigem que os materiais apresentem boa resistência ao desgaste, principalmente quando há necessidade de operação em alta temperatura, sem apresentar perda significativa de resistência mecânica. A aspersão térmica permite produzir uma cobertura de alta aderência sem que haja alteração nas características microestruturais do metal de base (substrato). Estudou-se, portanto, a resistência ao desgaste ao riscamento em materiais de Nióbio (Nb) com adição de Molibdênio (Mo). Os resultados obtidos, por meio dos ensaios de desgaste, mostram que as diferenças nas características morfológicas (porosidade e teor de óxidos) e DRX dos dois processos apresentam mecanismos tribológicos distintos. E que ambos os revestimentos se mostram capazes de proteger o substrato, não o expondo a um possível desgaste na região. Foi possível também observar que o revestimento apresentou uma espessura muito pequena, mas que não interferiu em sua capacidade de adesão e que o aumento de Mo gera um aumento de porosidade e reduz a aderência.

Palavras chave: Aspersão Térmica. Revestimento. Tribologia.

Abstract. Some industrial applications require that the materials have good wear resistance, especially when there is a need for operation at high temperature, without presenting significant loss of mechanical resistance. The thermal spraying allows to produce a high-adhesion coating without changing the microstructural characteristics of the metal base (substrate). Therefore, the scratch resistance in Niobium (Nb) materials with the addition of Molybdenum (Mo) was studied. The results obtained, through the wear tests, shows that the differences in the morphological characteristics (porosity and oxide content) and drx of the two processes present different tribological mechanisms. And that both coatings are able to protect the substrate, not exposing it to possible wear in the region. It was also possible to observe that the coating had a very small thickness, but that it didn't interfere with its adhesion capacity and that the increase in Mo generates an increase in porosity and reduces adhesion.

Keywords: Thermal Spray, Coating, Tribology

1. INTRODUÇÃO

Materiais utilizados em aplicações industriais, principalmente se atreladas à indústria petroquímica, requerem boa resistência ao desgaste, principalmente quando operados a alta temperatura, para que não apresentem perda significativa de resistência mecânica e falhas. Entretanto, muitas vezes estes materiais não são viáveis economicamente. Visando melhorar essas propriedades e obter melhores resultados nesta aplicação optou-se pela análise de revestimentos aspergidos por FS (Chama Pó) de Nb e Mo.

Este processo já é utilizado com êxito na indústria para obtenção de revestimentos para proteção à corrosão, cavitação e desgaste. O molibdênio e o nióbio são metais nobres que apresentam boas propriedades de resistência mecânica, boa estabilidade de suas propriedades em elevada temperatura.

Estudos desenvolvidos (de Czichos e Habig, 1992), mostram que cerca de 1% a 6% do PIB são perdidos com desgaste em países desenvolvidos. Trabalho de (Jost, 1990) sugeria que é possível reduzir as perdas por desgaste em até 20% com aplicação de conceitos tribológicos existentes. Segundo Mello (Erdemir, 2009) “[...] os custos de desgaste e atrito nos Estados Unidos da América perfazem a impressionante cifra de meio trilhão de dólares por ano. Com dados de 2008 isto significa um terço do PIB brasileiro.”

O gasto mencionado engloba não apenas a degradação do material devido às propriedades e constituintes do petróleo, mas também devido ao custo relacionado a diversos testes e ensaios que possuam indícios quantitativos quanto à vida útil, possibilidade de falhas, entre outros. Este fenômeno do desgaste abrasivo leva a perda progressiva de

material, que pode ser suficiente para causar danos, como mencionado anteriormente, indisponibilidade do equipamento ou perdas em termos financeiros e até mesmo afetar ao meio ambiente.

O nióbio metálico é usado como material estrutural na indústria aeroespacial e em tecnologias químicas e nucleares. Suas ligas encontram amplo campo de aplicações industriais. Entre as principais aplicações está seu uso como elemento de liga (formador de Carbonetos) em aços e em superligas. O extensivo uso do nióbio é devido seu elevado ponto de fusão, resistência preservada em elevadas temperaturas, plasticidade excepcional mesmo em temperaturas criogênicas (-200°C), supercondutividade favorável, densidade relativamente baixa quando comparada com outros metais de elevada temperatura.

Por ser um metal dúctil e macio é facilmente trabalhado a frio. Seu bom comportamento em trabalho a quente é uma importante propriedade do nióbio, pois aquecendo-o em temperatura de deformação a quente pode levá-lo a reagir com muitos gases ativos. No ponto de fusão e acima, o Nióbio reage com todos os fluxos conhecidos. Isso restringe a escolha do método de soldagem.

Os processos de aspersão térmica são formados por um grupo de técnicas que permitem depositar revestimentos de materiais metálicos, não metálicos ou misturas deles na forma de camadas, como descrito em (ASM, 2004; AWS, 1985). A aplicação de revestimento, como descreve, (Paredes, 1998; Lima e Trevisan, 2007) visa principalmente aproveitar as vantagens das propriedades específicas do material depositado, e com isso diminuir as taxas de desgaste e erosão em peças e componentes estruturais sujeitos a ambientes agressivos.

Para uma definição geral dos processos de aspersão térmica tem-se que o material de revestimento, que pode estar inicialmente na forma de pó, arame, vareta ou cordão flexível, é alimentado em uma pistola de aspersão que possui uma fonte de calor, cuja origem pode ser por combustão ou elétrico (arco elétrico, plasma, indução).

Nos processos de aspersão, trabalho recente (Sulzer, 2012; Pukasiewicz, 2008; Takimi, 2004) o material na forma de pó ou arame, ao passar pelo bico da pistola, é aquecido a elevada temperatura e transferido até o substrato por meio gasoso, neste momento as partículas absorvem energia térmica e cinética. Essas, ao colidirem com a superfície sucessivamente com elevada energia cinética e térmica, se deformam, arrefecem e se ancoram mecanicamente na rugosidade da superfície do material base, bem como sobre as partículas previamente depositadas, formando uma estrutura lamelar.

Tem-se que as características microestruturais dos revestimentos e, como consequência, as propriedades mecânicas apresentadas, são diretamente influenciadas pela limpeza da superfície, rugosidade e aquecimento do substrato (pré e/ou pós-aquecimento), e principalmente pelas magnitudes das energias térmica e cinética transferidas às partículas durante a aspersão. Estas, por sua vez, dependem diretamente do tipo de processo e dos parâmetros selecionados, como apresentado no trabalho (Lima e Trevisan, 2007).

Na sequência, a descrição do processo de aspersão térmica é apenas para o processo que compõe o planejamento experimental do artigo, ou seja, somente será apresentado em detalhe o processo por chama (FS) com alimentação a pó.

Processo que utiliza o calor gerado pela combustão de uma mistura de gases (oxigênio-acetileno ou oxigênio-propano) para fornecer a energia térmica para o material de deposição.

Trabalho recente, (Padilha, 2011) um jato composto por gases da combustão e o gás de transporte atomiza o metal fundido projetando-o com alta velocidade contra o substrato. A variação na porcentagem da mistura de gases utilizados interfere no aporte térmico fornecido à partícula a ser aspergida.

Os trabalhos (Smith e Dykhuizen, 1998; Lima e Trevisan, 2007) descrevem o processo, em que a pistola, o combustível e o oxigênio passam por uma câmara de mistura de gases antes de iniciar a combustão a frente do bico. O ganho de energia cinética pelas partículas em voo é dado pelo gás de transporte somado com a expansão dos gases de combustão, formando o fluxo de aspersão. O ar comprimido é utilizado para resfriar o bico da pistola e formar uma capa de ar que envolve o fluxo de aspersão, concentrando a chama e diminuindo o espalhamento das partículas aspergidas. O material aquecido, impelido contra o substrato, sofre deformação pelo impacto, se conformando sobre a rugosidade da superfície, formando pontos de ancoramento mecânico e, com isso, garantindo a aderência, resultando em uma camada de revestimento.

O “flame spray” é caracterizado por atingir velocidade de impacto de partículas de 30 até 180 m/s, temperaturas das partículas em voo entre 2000 e 2800 °C, tensão de aderência média entre 20 e 38 MPa, porosidade entre 15 e 20% e 4 a 15% de óxidos, como mencionado no trabalho (Irving, 1993).

Em relação ao desempenho de revestimentos, o desgaste é um problema recorrente e promove a deterioração de componentes que interagem em equipamentos utilizados na indústria, pelo efeito de perda de material na superfície em movimento dos corpos. De outra forma, o desgaste pode ser classificado como sendo a remoção indesejável de material de superfícies em contato por ação mecânica. Como analisado no trabalho (Davis, 2001).

Segundo Davis (2001), o desgaste por deslizamento pode ser classificado pelos principais mecanismos: abrasivo, adesivo e fadiga. De acordo com o autor, o desgaste abrasivo é definido pela interação entre partículas duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida. Basicamente, um material é fortemente raspado ou arranhado apenas por uma partícula mais dura. Este é classificado de acordo com o tipo de contato, bem como o ambiente de contato. Dessa forma os tipos de contato são caracterizados como 2-corpos e 3-corpos. A abrasão do tipo 2-corpos (desgaste por deslizamento) se caracteriza quando a partícula ou asperidade desliza sobre a superfície do material. No tipo 3-corpos (desgaste abrasivo por rolamento) as partículas estão soltas na interface e rodam causando indentações.

O desgaste abrasivo classifica-se também por: abrasão a baixa tensão, abrasão a alta tensão e abrasão de goivagem (impacto). Na abrasão a baixa tensão- dano é resultado da remoção de material por riscamento, portanto os abrasivos angulares com arestas vivas produzem desgaste mais severo. A abrasão a alta tensão ocorre quando os materiais abrasivos, ao serem forçados a passar entre duas superfícies sob tensão, são retidos pelas mesmas.

No trabalho (Davis, 2011) também cita que o dano na superfície é devido à combinação de riscamento e deformação elástica. A abrasão por goivagem ocorre pela remoção de material na superfície de um componente, submetido ao impacto localizado, pela ação cortante de partículas abrasivas. O corte causado pelo abrasivo produz ranhuras na superfície danificada.

De forma geral, este trabalho tem como objetivo caracterizar e testar a resistência ao desgaste de baixo ângulo de revestimentos NbMo depositados por aspensão térmica chama pó.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Moagem e Peneiração

O processo de moagem e sinterização de pós (MS) gera pequenas partículas (muitas vezes com diâmetro médio inferior a 5 μm) que não apresenta tamanho adequado para AT e por isso, são compactadas, sinterizadas e em seguida fraturadas no tamanho adequado para AT resultando em partículas tipo bloco e angular, mais ou menos porosas.

O processo de moagem mecânica (MM) foi usado para a fabricação de pós a partir do pó de Nb metálico de granulometria acima de 250 μm . O método para reduzir tamanho de partícula foi a moagem em moinho de bolas. O refinamento da partícula é obtido pela ação do impacto das bolas sobre o material e pela abrasão causada pelo movimento das esferas sobre as partículas e parede do tambor. Este processo permite obter partículas de tamanho médio tão baixa quanto 1 μm . Quando o material moído é dúctil, o resultado são partículas em forma de placas (flakes).

A separação da granulometria foi realizada por peneiramento, utilizando o intervalo de 45 a 63 μm .

2.3. Jateamento Abrasivo e Preparação da Superfície

O abrasivo utilizado foi o óxido de alumínio novo (Al_2O_3) com granulometria inicial 20 mesh. O jateamento foi realizado em um gabinete de jateamento CMV GS 9075 com jato pressurizado.

Distâncias de jateamento muito grandes (maiores que 200 mm), por exemplo, resultam em grãos abrasivos com menor energia cinética. Ângulo agudo entre o jato de abrasivo e a amostra causa arrancamento menos eficiente da superfície do substrato. Para granulometria próxima de 32 mesh as aderências tendem a ser melhores. Granulometrias mais grossas (20 mesh) tendem a apresentar uma faixa de aderência mais larga, de 24 a 82 MPa.

Para garantir a aderência adequada dos revestimentos ao substrato deve-se ativar a superfície, permitindo que as partículas projetadas no momento do impacto fiquem totalmente aderidas e livres de impurezas residuais. Esta ativação da superfície consta de três etapas:

- Limpeza (tipo Sa3, obtida por processos químico, térmico ou mecânicos)
- Rugosidade da superfície (obtida pelos processos de jateamento abrasivo ou mecânicos)
- Preaquecimento (atingido por chama externa ou chama da própria pistola de aspensão).

2.5. Revestimento das amostras

Após a preparação das amostras realizou-se a deposição do Nióbio. Esse material foi doado pela CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Araxá-MG). Pelo processo de peneiramento automático realizado com equipamento CT-025 da marca Vibrotech, separou-se o pó de granulometria entre 250 – 325 Mesh Tyler (0,063 - 0,045 mm). Essa faixa granulométrica foi escolhida, pois a utilização de pós de menor granulometria entupiu o sistema de alimentação do equipamento, e pós com faixa granulométrica maior não passaram por tal sistema.

Os três tipos de misturas utilizadas foram: pó de Nióbio puro, pó de Nióbio com 20% de Molibdênio e pó de Nióbio com 30% de Molibdênio.

2.6. Teste de aderência por ensaio de tração

Para o ensaio de aderência por tração as amostras revestidas foram coladas aos contra corpos, que foram jateados para obter uma superfície limpa e com rugosidade adequada. A colagem foi realizada à temperatura ambiente, sendo os pares colados com o auxílio de um gabarito, que garante o alinhamento. Neste, uma mola é comprimida para proporcionar a pressão necessária para o processo de cura ser adequado. O tempo de cura da cola foi de 24 horas e a cola utilizada foi a Araldite Profissional, da marca TekBond.

2.7. Metalografia

Para a realização das análises microestruturais foram preparadas amostras metalográficas, começando pelo corte das amostras, seguindo por embutimento, lixamento e polimento, conforme método I sugerido pela norma ASTM E1920 (2008).

2.8. Análise da fração de óxidos e poros

A análise para quantificar o percentual de poros e fração em área de óxidos foram realizadas nas imagens de tons de cinza obtidas por MEV convertidas para 8 bits. Esta análise seguiu o método de teste B, da norma ASTM E2109 (2014).

Com a definição de cada microconstituente através da técnica threshold, onde é possível associar uma cor distinta para cada intervalo de tons de cinza respectivo aos poros, óxidos e fase metálica, calculou-se a fração em área de cada cor na imagem. Nesta técnica, utilizaram-se imagens da seção transversal. No entanto, não foi utilizado para o cálculo de poros devido à pequena espessura dos revestimentos o qual levaria a uma incerteza de medição.

Neste trabalho foram usadas imagens com ampliações de 20x obtidas por microscopia óptica. Para este procedimento foi utilizado o software de análise de imagens Fiji.

A

Figura 1 mostra um exemplo de identificação dos microconstituintes na microestrutura (a) e a aplicação do threshold sobre cada tonalidade de cinza referente aos óxidos, poros e metal (b). Nela, temos em (a) imagem por MEV-BSE em escala de cinza 8 bits; em (b) mesma imagem de (a) após aplicação da técnica de threshold, sendo a cor vermelho os poros, verde os óxidos e amarelo o metal.

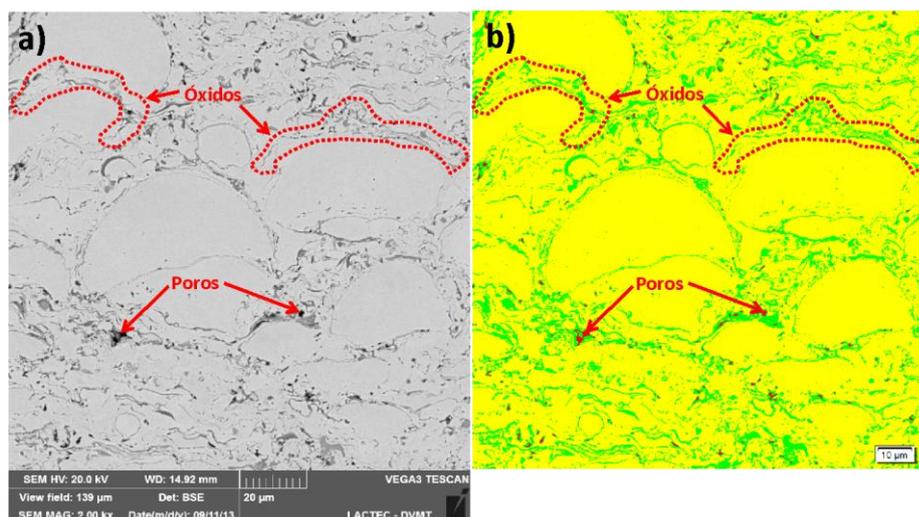


Figura 1. Exemplo de aplicação do método de medição de porosidade e teor de óxidos na microestrutura do revestimento, conforme ASTM E2109 (Sucharski, 2016)

2.9. Teste de riscamento

O teste de riscamento foi realizado com o intuito de identificar o comportamento tribológico das ligas cerâmicas na condição de como aspergido, sendo testado sobre uma condição severa de desgaste, ou seja, pressão de contato elevada com baixo ângulo de deslizamento, conforme a Figura 2.

Os testes foram conduzidos sobre a rugosidade dos revestimentos na condição de como aspergido, o que permite simular uma condição de operação onde não há nenhum tipo de acabamento após aspersão. Foram baseados na norma ISO 27307:2015(en): *Thermal spraying — Evaluation of adhesion/cohesion of thermal sprayed ceramic coatings by transverse scratch testing*.

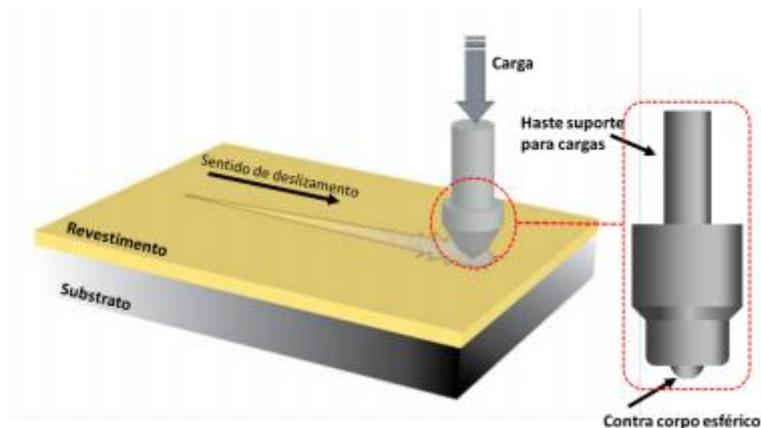


Figura 2. Desenho esquemático do teste de riscamento (Sucharski, 2016)

Testes preliminares foram conduzidos com dois tipos de contra corpo: um tipo piramidal de base quadrada (indentador Vickers) e outro esférico de diâmetro 1,6 mm. O contra corpo esférico foi adotado para os testes pois o indentador Vickers gerou penetração excessiva, chegando ao substrato, isto ocorreu pela pressão de contato ser muito alta devido o raio da ponta ser muito pequeno, em torno de 1,3 μm (PULECIO, 2010).

A Tabela 1, a seguir, apresenta os parâmetros do ensaio de riscamento.

Tabela 1. Parâmetros do ensaio de riscamento (As autoras, 2019)

Carga (kg)	Comprimento do risco (mm)	Velocidade do risco (mm/min)	Raio do indentador (mm)
1,5 / 5,5	40	120	0,8

Foram feitos riscos com as cargas 1,5 kg e 5,5 kg. As cargas intermediárias não apresentaram resultados significativos, e 10 kg apresentou resultados com penetração excessiva, ultrapassando a espessura dos revestimentos. A menor carga é limitada ao peso da haste do contra corpo, as outras foram conseguidas pela adição de anéis com peso padrão.

2.10. Análise por microscopia confocal

As análises dos riscos foram feitas por microscopia confocal, com o equipamento Lext OLS400 3D Laser, fabricado pela Olympus. Esta técnica permite gerar imagens tridimensionais da topografia da amostra pela reflexão de um laser através de lentes objetivas, gerando três formas possíveis de visualização: a imagem gerada pelo laser (em escala de cinza); a imagem por microscopia ótica (colorida); e uma imagem do perfil de rugosidade em 3D (escala de cores).

A microscopia confocal permitiu caracterizar a profundidade alcançada no teste de riscamento. As análises foram feitas com uma lente objetiva de 20x, o que resulta em uma área de 640 μm^2 .

Os riscos foram analisados no fim das trilhas. As medições foram realizadas em uma seção transversal da trilha, sendo calculada a penetração da impressão gerada pelo indentador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Aderência

O ensaio de tração realizado a partir do pó de Nióbio puro apresentou uma média de 26,49 MPa que garante uma aderência elevada, principalmente considerando que a cola apresentou cerca de 35,44 Mpa, com uma fratura interlamelar, isto é, o rompimento aconteceu no revestimento e não na cola, o que garante a eficácia do ensaio e uma boa aderência do revestimento no substrato. As falhas foram totalmente coesivas, como descritas acima, no interior do revestimento entre as lamelas. Foi possível notar também um desvio padrão de 3,7 MPa, que é um número elevado, mas que pode variar quanto às condições do ambiente e a maneira com que as amostras foram preparadas.

A amostra com 20% de Molibdênio apresentou uma fratura mista: interlamelar e no adesivo. Caracterizando uma aderência satisfatória, com falhas parcialmente coesivas no qual há uma parcela na área da interface revestimento/adesivo. A média obtida foi de 12,64 MPa e o desvio padrão de 0,04 MPa que é um ótimo valor, visto que não há grandes variações.

Na amostra Nb30Mo há falhas entre o substrato e o revestimento, com uma parcela da área na interface revestimento/adensivo. A fratura caracteriza-se como mista: interface revestimento/adensivo e no adensivo com uma média de 5,81 MPa e um desvio padrão de 0,15 MPa garantindo certa acuracidade dos resultados obtidos.

A

Figura 3 apresenta as amostras após o ensaio de aderência, enquanto a Figura 4 mostra o gráfico com os resultados do ensaio de aderência.

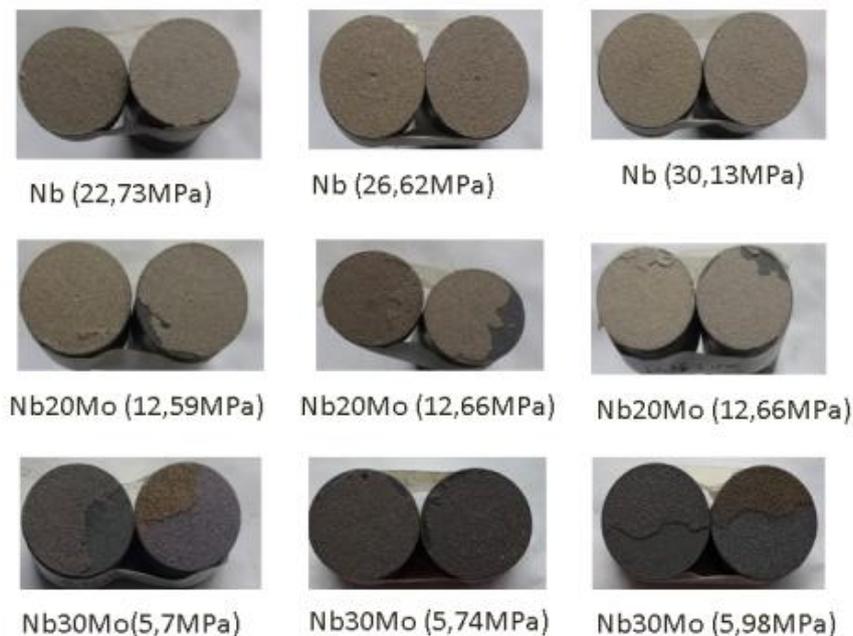


Figura 3. Amostras após ensaios de aderência (As autoras, 2019)

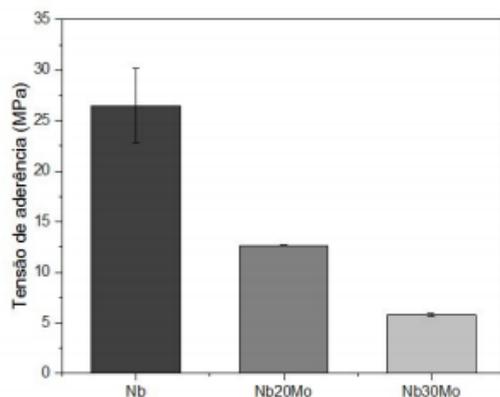


Figura 4. Gráfico com os resultados dos ensaios de aderência (As autoras, 2019)

3.2. Teor de óxidos

Com base no estudo metalográfico realizado, foi possível observar que o aumento de Mo gera um aumento de óxidos que reduz a aderência do revestimento no substrato, devido a presença de micro trincas na região. As panquecas do revestimento tornam-se mais finas e reduzidas, com a presença de óxidos. A quantidade de óxidos aumentou conforme aumentava a presença de Mo. A porosidade não foi medida devido à baixa espessura do revestimento.

Na Figura 5, podemos verificar as imagens feitas por microscopia ótica. O gráfico com o teor de óxidos é apresentado na Figura 6.

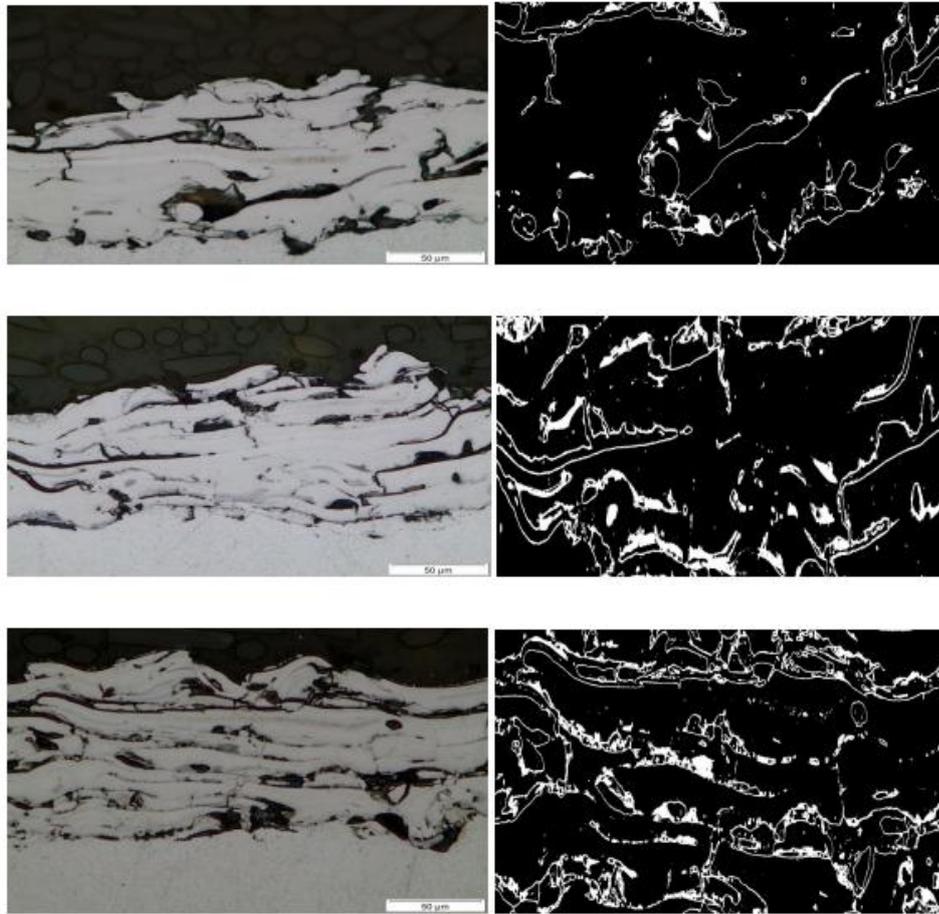


Figura 5. Imagem do revestimento à direita e à esquerda o teor de óxidos, respectivamente dos revestimentos de Nb, Nb20Mo, Nb30Mo (As autoras, 2019)

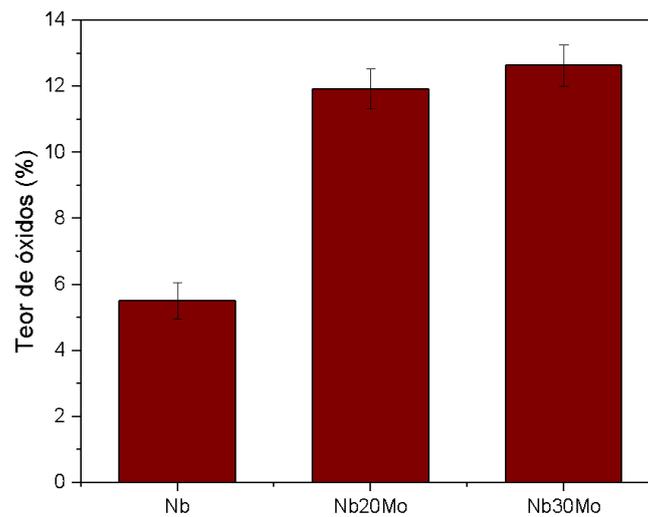


Figura 6. Gráfico com o teor de óxidos (As autoras, 2019)

3.3. Caracterização dos riscos

Nas imagens a seguir pode-se observar a análise do ensaio de riscamento por meio do microscópio confocal, no qual podemos avaliar a profundidade do riscamento e, por consequência, a capacidade de coesão do revestimento atrelado à aderência deste sobre o substrato.

A

Figura 7,

Figura 8 e

Figura 9 mostram os riscos sobre os revestimentos de Nb, Nb20Mo e Nb30Mo, respectivamente. À esquerda encontra-se a imagem 3D do revestimento e à direita a imagem obtida pelo microscópio óptico.

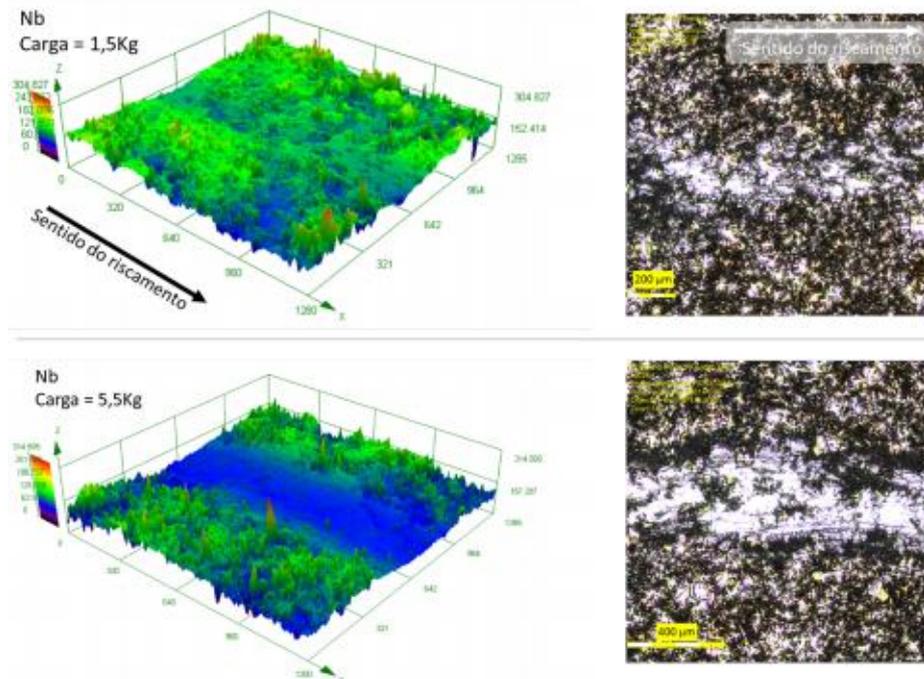


Figura 7. Riscos sobre o revestimento de Nb (As autoras, 2019)

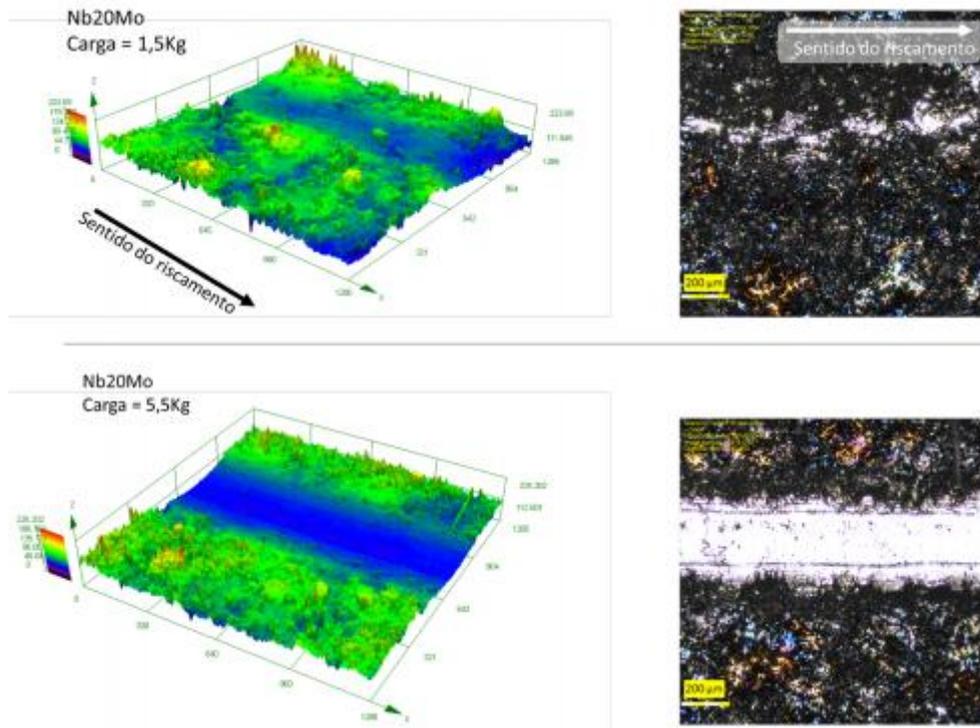


Figura 8. Riscos sobre o revestimento de Nb20Mo (As autoras, 2019)

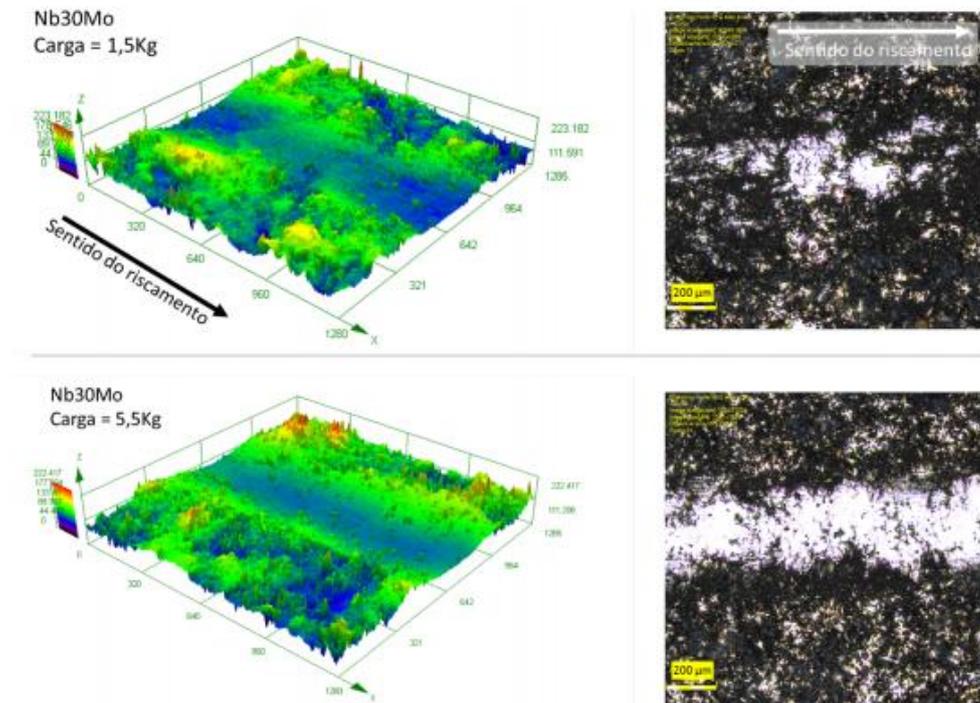


Figura 9. Riscos sobre o revestimento de Nb30Mo (As autoras, 2019)

3.4. DRX

Com a técnica de difração de raios X (DRX) foi possível identificar as fases presentes na microestrutura dos revestimentos. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados nas análises por DRX e a Tabela 3 apresenta as fases encontradas nos revestimentos aspergidos.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas análises por DRX (As autoras, 2019)

Alvo	Cu K α ($\lambda= 0,15406$ nm)
Tensão	40 kV
Corrente	20,0 mA
Movimentação do eixo	$\theta - 2\theta$
Faixa de varredura	30° à 105°
Velocidade de varredura	1°/min
Amostragem (step)	0,02°
Modo de varredura	Contínua

Tabela 3. Fases encontradas nos revestimentos aspergidos (As autoras, 2019)

Fase	Carta de referência
Nb puro	088-2330 035-0789
Mo puro	004-0809
NbO	043-1290
NbO ₂	034-0898
MoO ₂	073-1249

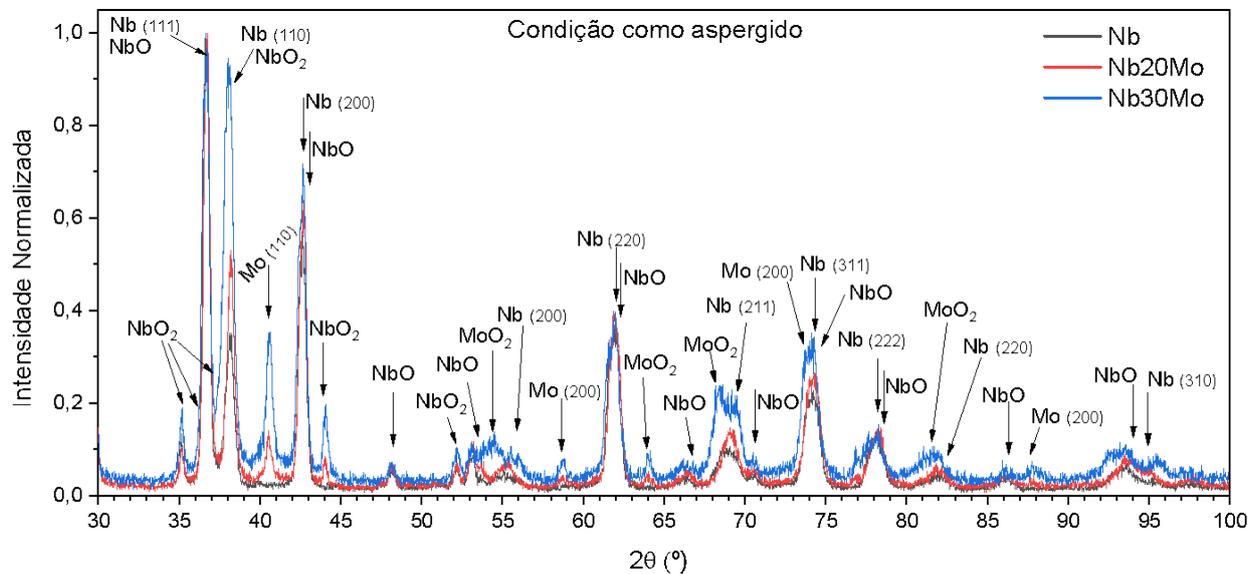


Figura 10. DRX dos revestimentos (As autoras,2019)

A

Figura 10 apresenta o DRX dos revestimentos aspergidos. A partir da análise das difrações de raio x não foi encontrado a evidência da formação de uma fase em solução sólida de Nb+Mo, no entanto, há a presença dos componentes metálicos (Nb e Mo) puros, bem como, fases óxidas dos dois materiais.

4. CONCLUSÃO

Os revestimentos apresentaram bom desempenho a resistência ao desgaste de baixo ângulo (riscamento), portanto a capacidade de coesão do material ao substrato é alta, apesar de apresentarem uma espessura pequena. Concluiu-se que o aumento de Mo diminui essa resistência ao desgaste, possivelmente pelo aumento dos óxidos interlamelares. Esse fato contrariou o que era esperado, pois acreditávamos que com o Mo essa resistência fosse aumentada, considerando sua característica autolubrificante. Associado a isso, pode-se observar também que o aumento de Mo gera um aumento no teor de óxido, como pode ser observado através da análise por microscopia óptica, que interfere na capacidade de coesão do material. Por fim, podemos afirmar que não foi possível obter formação de fases em solução sólida de NbMo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao professor MS. Gustavo Bavaresco, que indicou o estudo com Nb e Mo, nos conduziu no processo, esteve presente durante as etapas, nos forneceu suporte técnico e pela paciência.

Ao professor Dr. Ramon Cortez pelo incentivo e oportunidade de trabalhar no laboratório de aspersão térmica.

Aos colegas do LABATS que nos auxiliaram no decorrer da pesquisa.

A organização do CREEM pelo evento.

6. REFERÊNCIAS

- ASM, American Society for Metals, Surface Engineering, Materials Park, v. 5, OH, Estados Unidos, ASM Handbook, 1994.
- ASTM E1920: Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Spray Coatings. American Standard of Testing Materials. West Conshohocken: 2008.
- AWS, American Welding Society. *Thermal Spray: practice, theory, and application*. Estados Unidos, Florida, 1985.
- Czichos, H., & Habig, K. H. (2010). *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Springer-Verlag.
- Davis, J. R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International. USA, 2001.
- Dykhuisen, R.C., Smith, M.F. Gas dynamic principles of cold spray. *J Therm Spray Tech* **7**, 205–212 (1998). <https://doi.org/10.1361/105996398770350945>.
- Erdemir, A. (2009) *Innovative Design Concepts for the Development of Superhard and Low-friction Nano-composite Coatings*. Plenary lecture, 64º Congresso Annual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Irving, R., Knight, R. and Smith, R. W. The HVOF Process -the Hottest Topic in the Thermal Spray Industry. *Welding Journal*, July, p. 25-30. 1993
- Jost, H.P. *Tribology –origin and future*. WEAR, 136, p. 1–17, 1990.
- Lima, C.C., Trevisan, R.. *Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações*. Artliber Editora, São Paulo, Brasil, 2007.
- Padilha, Hélio. *Desenvolvimento “in situ” de intermetálicos Ni-Al em superfícies de aço inoxidável AISI 304 através da aplicação por aspersão térmica de mistura de pós de níquel e alumínio*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- Paredes, R. S. C. *Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra corrosão marinha*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (1998).
- Pukaszewicz A.G.M., H.E. de Boer, G.B. Sucharski, R.F. Vaz, L.A.J. Procopiak, *The influence of HVOF spraying parameters on the microstructure, residual stress and cavitation resistance of FeMnCrSi coatings, Surface and Coatings Technology*, Volume 327, 2017, Pages 158-166.
- Rodríguez Pulecio, Sara Aida. *Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional-análise de unicidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador*. Diss. Universidade de São Paulo, 2010.
- 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*. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- Sulzer. An Introduction to Thermal Spray. Sulzer Metco, v. 4, n. 4, Suíça, 2012.
- Takimi AS. *Obtenção de superligas de NiCrAlY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF)* [masters dissertation]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.
- Tensile Adhesion Testing of Thermal Spray Coatings. Disponível em: <<http://www.asminternational.org/emails/etssspraytips/010609/tsssenews010609.html>>. Acessado: 30 set. 2018

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.