

ANÁLISE DA RUGOSIDADE NA PERDA DE MASSA EM ENSAIOS DE CAVITAÇÃO E JATO DE LAMA

Solmar Iurk das Chagas

Anderson Geraldo Marenha Pukasiewicz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa, PR, 84017-220

solmariurk@gmail.com, anderson.pukasiewicz@gmail.com

Resumo. O objetivo deste trabalho é verificar a influência da rugosidade superficial da amostra sobre o efeito do desgaste superficial nos ensaios de cavitação e slurry, sendo que ambos os desgastes físicos superficiais podem ocorrer em pás de turbinas de hidrelétricas. Compararam-se as amostras que foram revestidas pelo método de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF), antes e após preparação por lixamento e polimento, com verificação do Ra, Rz e do Sa, Sz superficial, juntamente com imagens 3D da superfície e análise da perda de massa. Observou-se que a rugosidade só tem influência nos primeiros minutos do ensaio, e que quanto maior a rugosidade inicial, maior a taxa de perda de massa inicial nos ensaios, observa-se também que com o decorrer dos ensaios de desgaste a rugosidade e a taxa de perda de massa das amostras aspergidas convergiram.

Palavras chave: Rugosidade. Cavitação. Slurry. HVOF.

1. INTRODUÇÃO

Em usinas hidrelétricas ou turbinas de máquinas de fluxo, observa-se que as pás das turbinas ocorrem dois tipos de desgaste, um devido ao contato físico de partículas, e também devido a implosão de bolhas, geradas devido a diferença de pressão (cavitação). A partir da análise destes problemas, o melhoramento da performance das turbinas, pode ser obtido depositando um revestimento nas pás das turbinas de tal maneira que a deixe mais resistente a esses tipos de desgastes, no qual ocasiona menor tempo de manutenção das turbinas e maior tempo de operação. Este revestimento pode ser depositado pelo método de aspersão térmica, onde suas propriedades podem ser definidas a partir de ensaios específicos como ensaio de cavitação e de Slurry, que simula os dois tipos de desgastes ocorridos nas pás.

No processo de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF) o material encontra-se em um estado inicial de pó. Os revestimentos usados, Cr_3C_2 25NiCr e WC10Co4Cr, apresentam alta resistência ao desgaste e erosão, além de elevada dureza e boa tenacidade (Bertuol, 2020). A metodologia HVOF possui algumas vantagens perante outros métodos como baixa porosidade, elevada dureza superficial, alta ligação entre lamelas que ocorre devido a boa ligação intermolecular devido ao aquecimento do pó para ter uma boa aderência no substrato, e uma baixa descarbonetação comparada aos outros métodos, sabendo que a descarbonetação é algo que não se consegue evitar devido a distância entre o bocal da pistola e da superfície da amostra necessária, dando tempo de reação suficiente para descarbonetação (Bolelli, 2014). Neste processo os jateamentos dos gases chegam a 2000m/s e com um fluxo de partículas que varia entre 400~800m/s, com temperaturas entre 1600~2200°C e pressões entre 551,6~620,53kPa, com uma distância entre a pistola de aspersão e a chapa de aço de 120~150mm.

Neste sentido, avaliaremos a influência da rugosidade inicial do revestimento dos materiais Cr_3C_2 25NiCr e WC10Co4Cr sobre estes desgastes, avaliando-os a partir da perda de massa e da diferença das rugosidades das amostras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os revestimentos foram depositados em chapas de aço carbono SAE 1020, medindo 40mmx200mmx4,75mm previamente jateada com alumina, obtendo Ra de pelo menos 6,0 μm , foi utilizado o método de aspersão térmica de alta velocidade HVOF. Logo abaixo na Fig. 1a, temos a aspersão sendo aplicada, podendo analisar o bocal, a distância entre a amostra e o bocal, na Fig. 1b, temos o modo de posicionamento das amostras durante a aspersão.

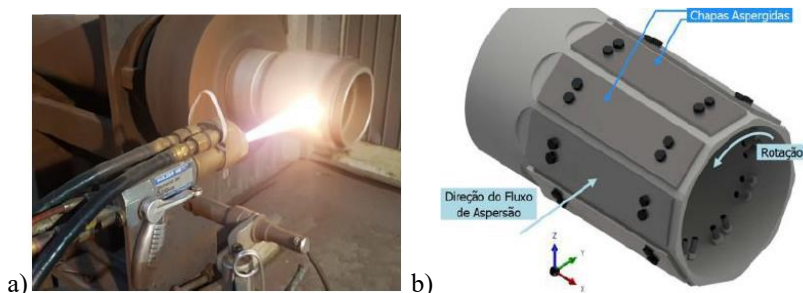


Figura 1. a) Aplicação do revestimento pelo método HVOF nas chapas de aço carbono SAE 1020 (Bertuol, 2020). b) Posicionamentos das chapas aço carbono SAE 1020 antes da aplicação do revestimento de forma ilustrativa (Bertuol, 2020)

Após o processo de aspersão térmica, ocorre a preparação das amostras que a partir das chapas de aço carbono SAE 1020 de tamanho 40mmx200mmx4,75mm, foram retiradas amostras de tamanho 40mmx25mmx5mm (o aumento da espessura é devido ao revestimento) com a cortadeira MAXICUT METALOTEST, no qual foi totalizado 8 amostras, 4 de Cr_3C_2 25NiCr e 4 de WC10Co4Cr, do qual foram cortadas da mesma chapa preparada na aspersão, sendo metade para os ensaios de cavitação (2 amostras de cada material) e a outra metade para os ensaios de slurry, para verificar a influência da rugosidade inicial das amostras.

Foram utilizadas lixas de diamante na granulação 220,600 e 1200 μm e um polimento de 3 e 0,25 μm , e o restante das amostras foi ensaiada como aspergido, logo as amostras aspergidas com alta rugosidade inicial, e as amostras preparadas com baixa rugosidade inicial. Ficando então, 4 amostras de Cr_3C_2 25NiCr, 2 para cavitação (1 polida e 1 aspergida), 2 para slurry (1 polida e 1 aspergida), 4 amostras de WC10Co4Cr, 2 para cavitação (1 polida e 1 aspergida), 2 para slurry (1 polida e 1 aspergida).

Após a preparação das amostras, realizou-se o ensaio de cavitação segundo norma ASTM 32-16. No ensaio foi usado uma frequência vibracional de 20kHz e uma amplitude de 50 μm com água destilada em todos os ensaios sem que haja contato entre o sistema vibracional e a amostra, na Fig. 2a temos uma imagem esquemática do sistema do ensaio, e na Fig. 2b temos a máquina utilizada para o ensaio.

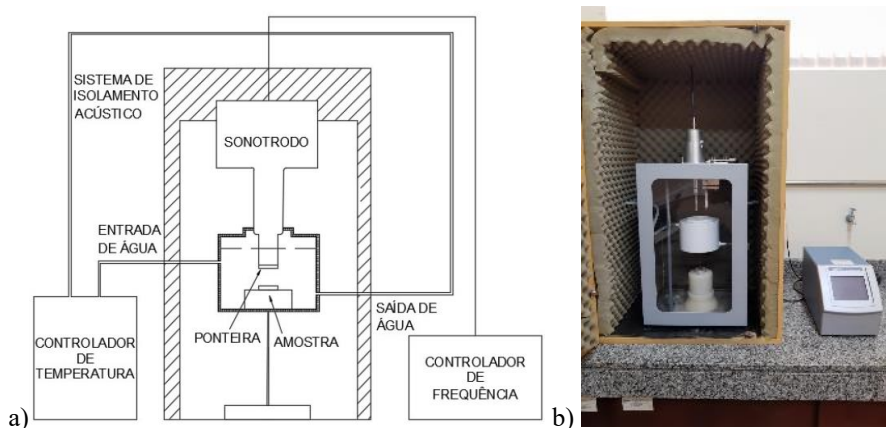


Figura 2. a) Imagem ilustrativa esquemática do funcionamento do ensaio de cavitação (Bertuol, 2020). b) Imagem do sistema Qsonico Q700 usado para o ensaio de cavitação.

Os ensaios foram realizados até o tempo acumulado total de 122 minutos, nos tempos 1,2,4,8,16,32,64,96 e 122min, o intervalo máximo foi de 30 minutos devido ao aquecimento do sistema de ensaio, que pode afetar os resultados devido à alta temperatura. As amostras foram retiradas para limpeza em aparelho ultrassônico em álcool nos intervalos de tempo para pesagem, posteriormente com secagem com soprador térmico durante 5 minutos e um resfriamento ao ar livre, e então realizada a pesagem, voltando ao ensaio após a pesagem das amostras para gerar os resultados mais a diante.

Após a preparação das amostras também realizamos os ensaios de Slurry Jet Erosion Tester, que é um ensaio que simula uma abrasão misturando areia com água, que se baseia em um ensaio de desgaste superficial a partir da projeção de partículas solidas da areia com a superfície da amostra. Este ensaio baseia-se na norma ASTM G76-18 (Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets) modificadas para meio aquoso. A erosão é controlada por dois motores, um que controla a vazão da areia e outro da água, de forma a misturar ambas posteriormente e criando um 'jato de lama', na Fig. 3a temos uma imagem esquemática do ensaio, e na Fig. 3b a máquina utilizada para a realização dos ensaios.

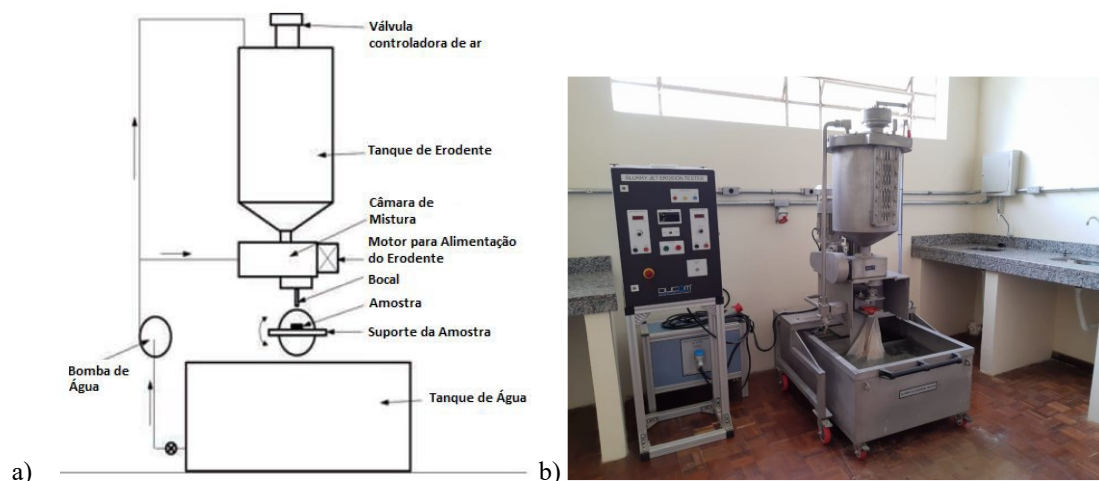


Figura 3. a) Imagem ilustrativa esquemática do funcionamento do ensaio de slurry (Bertuol, 2020). b) Imagem do sistema DECOM-Slurry Jet Erosion Tester usada para o ensaio de slurry.

As rotações dos motores usados no ensaio foram de: água, 750rpm e areia, 30rpm, com a amostra num ângulo de 90°. Utilizou-se areia com granulação entre 200~400µm, os tempo de ensaio acumulado total foi de 20 minutos, sendo que nos tempos de 0.5,1,2,4,8,12,16,20min, o maior intervalo de tempo nos ensaios era de 4 minutos devido a quantidade máxima de area disponível para o ensaio, a amostra foi retirada para limpeza em aparelho ultrassônico em álcool, com secagem com secador térmico durante 5 minutos mais um resfriamento ao ar livre, então realizada a pesagem da amostra, voltando para o ensaio posteriormente para gerar os resultados.

O ensaio de perfilometria é um ensaio que faz a análise topográfica superficial da amostra para análise da rugosidade, neste caso, este ensaio foi realizado em todas as amostras, antes de começar o ensaio, e após a finalização do ensaio, para comparar os resultados da rugosidade inicial da amostra com o resultado final. De cada amostra foram retiradas 4 imagens uma ao lado da outra, que se juntam no final tendo maior precisão na medida da rugosidade, com um aumento de 10X. O perfilmetro usado para a obtenção de dados foi o perfilmetro Talysurf CCI MP, no qual utiliza das normas ISO 4287 (Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade) e ISO 25178 (Especificações geométricas do produto (GPS) – Textura da superfície: Termos, definições e parâmetros de textura da superfície) para obtenção de resultados.

3.RESULTADOS

Os gráficos de perda de massa em função do tempo acumulado, Fig. 4a Cr₃C₂ 25NiCr e Fig. 4b WC10Co4Cr, mostrados logo a baixo, comparam as amostras na situação como aspergida com uma amostra polida, no qual como citado anteriormente a aspergida apresenta maior rugosidade inicial do que a amostra polida, verificando as diferenças entre elas.

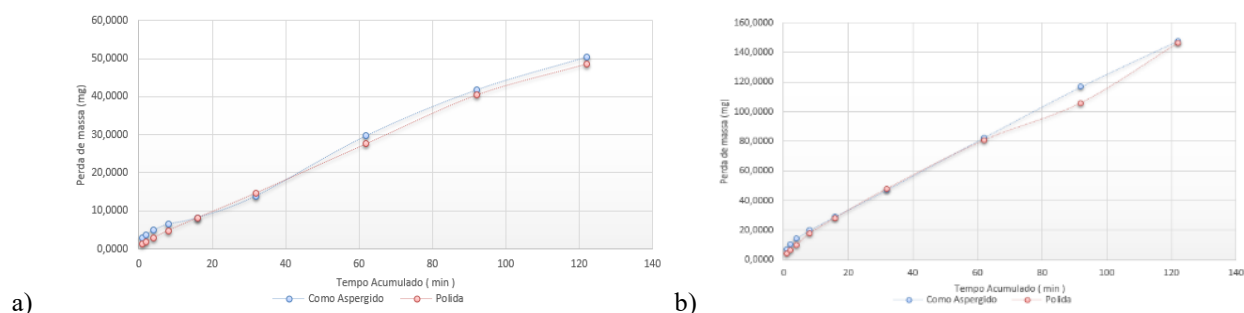


Figura 4. a) Gráfico de perda de massa do material Cr₃C₂ 25NiCr no ensaio de cavitação. b) Gráfico de perda de massa do material WC10Co4Cr no ensaio de cavitação.

A dureza e a tenacidade do revestimento são fatores muito importantes para a resistência ao desgaste, mas como as amostras comparadas são da mesma peça inicial e consequentemente do mesmo material, temos que isso não envolve a

diferença na perda de massa. A única diferença entre os materiais é a rugosidade inicial das amostras, no qual a aspergida obtém uma rugosidade inicial muito maior que a amostra preparada, logo a diferença na perda de massa se encontra nesse requisito.

Observando até os primeiros 8 minutos de ensaio, vemos uma perda de massa mais acelerada para as amostras como aspergidas, comparada com as polidas, tendo esse pico inicial devido à alta rugosidade comparada com a outra amostra, porém após disso, temos um paralelismo entre as curvas aspergida e polida em ambas os materiais, mostrando que a tendência da taxa de perda de massa está cada vez mais próximas entre as duas amostras, logo com isso, pode-se dizer que a rugosidade, único motivo para diferenciação da perda de massa, cada vez fica mais parecida ao decorrer do ensaio em ambas as amostras.

Nos resultados dos ensaios do Slurry, obtemos o mesmo resultado como demonstra as imagens Fig. 5a, do material Cr_3C_2 25NiCr, e a Fig. 5b do WC10Co4Cr, logo abaixo.

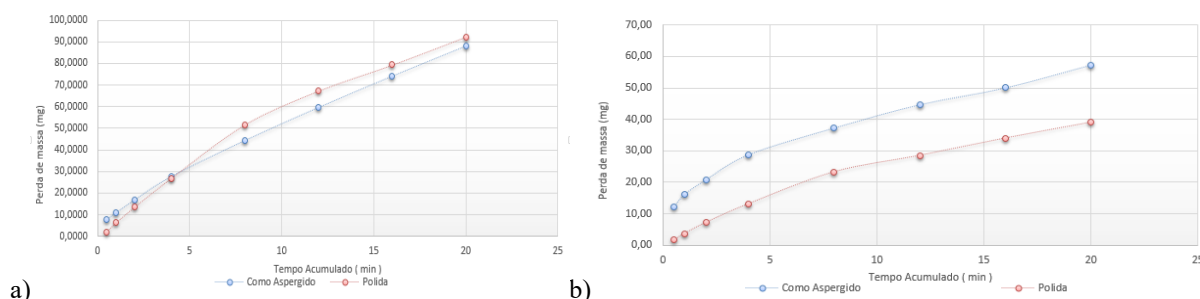


Figura 5. a) Gráfico de perda de massa do material Cr_3C_2 25NiCr no ensaio de Slurry. b) Gráfico de perda de massa do material WC10Co4Cr no ensaio de slurry.

Nos dados do Slurry, observamos que o gráfico do Cr_3C_2 25NiCr, fica bem parecido com o da cavitação, já no material WC10Co4Cr isto não ocorre, tendo um aumento da perda inicial da massa muito mais alta pela aspergida no começo do ensaio, mostrando a diferença da rugosidade inicial, e após isto, apesar da distância das curvas, se observa que o paralelismo continua, mostrando a tendência da taxa de perda de massa parecida, logo a rugosidade das amostra também ficam mais parecidas ao decorrer dos ensaios.

A análise de rugosidade foi realizada antes do ensaio quanto depois, os resultados são mostrados na tabela abaixo. Os dados obtidos na perfilometria são parâmetros de amplitude, sendo perfis de rugosidade em μm , como a rugosidade média medida por um centro de linha média de acordo com a ISO 4287 (R_a), e a rugosidade média aritmética de valores da rugosidade parcial de acordo com a ISO 4287 (R_z), também se tem os parâmetros de altura em μm de acordo com a ISO 25178 (S_a e S_z).

Tabela 1. Comparação de dados de rugosidade entre amostras aspergidas e polidas do material Cr_3C_2 25NiCr nos tempos de 0 e 20 minutos acumulados no ensaio de Slurry.

Amostra	R_a (μm) ISO 4287	R_z (μm) ISO 4287	S_a (μm) ISO 25178	S_z (μm) ISO 25178
Aspergida (0 minutos)	7.00	58.5	7.82	87.4
Polida (0 minutos)	0.02	0.23	0.43	0.03
Aspergida (20 minutos)	1.73	27.1	1.90	48.3
Polida (20 minutos)	1.58	23.2	1.71	41.7

Tabela 2. Comparação de dados de rugosidade entre amostras aspergidas e polidas do material Cr_3C_2 25NiCr nos tempos de 0 e 122 minutos acumulados no ensaio de cavitação.

Amostra	R_a (μm) ISO 4287	R_z (μm) ISO 4287	S_a (μm) ISO 25178	S_z (μm) ISO 25178
Aspergida (0 minutos)	8.45	68.0	10.40	98.80
Polida (0 minutos)	0.03	0.19	0.03	0.35
Aspergida (122 minutos)	44.20	319.0	49.40	394.0
Polida (122 minutos)	31.40	223.0	34.80	274.0

Tabela 3. Comparação de dados de rugosidade entre amostras aspergidas e polidas do material WC10Co4Cr nos tempos de 0 e 20 minutos acumulados no ensaio de Slurry.

Amostra	Ra (μm) ISO 4287	Rz (μm) ISO 4287	Sa (μm) ISO 25178	Sz (μm) ISO 25178
Aspergida (0 minutos)	6.84	53.70	76.60	7.80
Polida (0 minutos)	0.02	0.23	0.43	0.03
Aspergida (20 minutos)	2.72	27.20	3.0	44.90
Polida (20 minutos)	3.42	40.80	3.75	66.80

Tabela 4. Comparação de dados de rugosidade entre amostras aspergidas e polidas do material WC10Co4Cr nos tempos de 0 e 122 minutos acumulados no ensaio de cavitação.

Amostra	Ra (μm) ISO 4287	Rz (μm) ISO 4287	Sa (μm) ISO 25178	Sz (μm) ISO 25178
Aspergida (0 minutos)	7.66	57.0	8.69	83.30
Polida (0 minutos)	0.11	3.21	0.40	57.3
Aspergida (122 minutos)	43.40	317.0	48.40	391.0
Polida (122 minutos)	45.90	307.0	51.20	376.0

Comparando os valores das tabelas, vemos que a rugosidade inicial no começo tem valores bem distintas devido ao processo antes do ensaio, porém na finalização do ensaio, obtemos valores muito próximos, comparando tanto as amostras polidas com as aspergidas do mesmo material (mesmo tendo uma diferença grande no começo dos valores da rugosidade) e se observa valores próximos também entre os materiais distintos no final do mesmo ensaio, isso explica o paralelismo das curvas de perda de massa, mantendo a taxa de perda de massa parecida depois de um determinado tempo, mostrando que quanto mais próximo a rugosidade das duas amostras, as curvas tendem a ter um comportamento de paralelismo de acordo com o tempo.

Temos também que a tendência de acordo com o aumento do ensaio é ter uma rugosidade igual, em um tempo muito longo, mostrando que a rugosidade a partir de um determinado tempo independe da rugosidade inicial da amostra, e que ela é definida pelo tipo de desgaste ocasionado na superfície da amostra, mostrando a aproximação da rugosidade final da cavitação muito maior que a rugosidade inicial do material aspergido, e no slurry a rugosidade final ficando entre os materiais aspergidos e preparados.

Conseguimos observar essas diferenças de rugosidade também nas imagens 3D avaliadas pelo perfilômetro nas Fig. 6a, na qual é da amostra aspergida em 0 minutos, da Fig. 6b, que é da amostra polida em 0 minutos, também nas Fig. 7a e Fig. 7b temos as mesmas em 20 minutos.

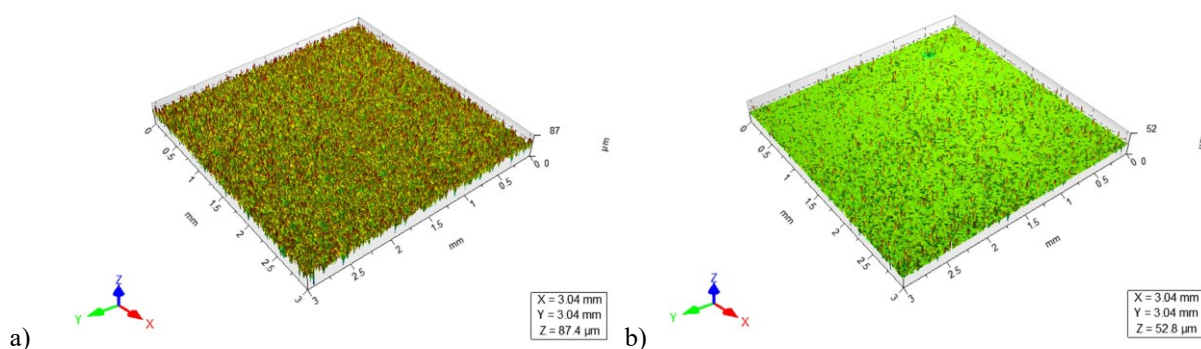


Figura 6. a) Imagem topográfica da amostra Cr₃C₂ 25NiCr aspergida em 0 minutos. b) Imagem topográfica da amostra Cr₃C₂ 25NiCr polida em 0 minutos.

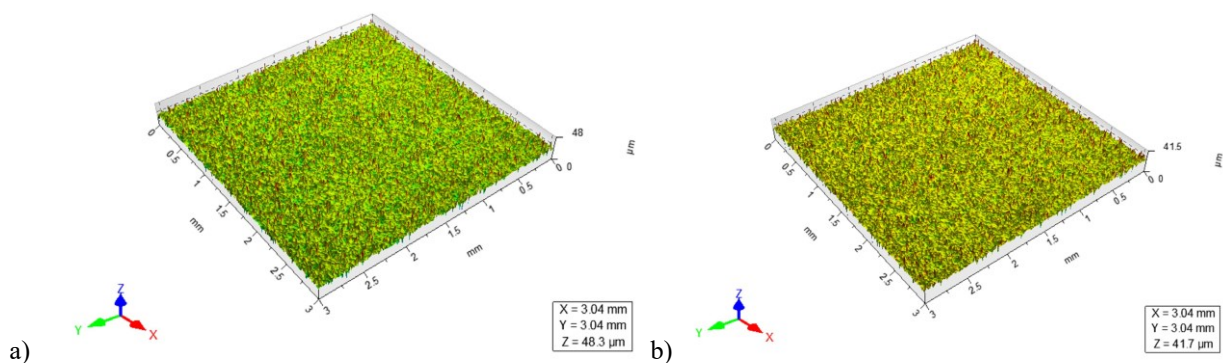


Figura 7. Imagem topográfica da amostra Cr_3C_2 25NiCr inicialmente aspergida após 20 minutos no ensaio de Slurry. b) Imagem topográfica da amostra Cr_3C_2 25NiCr inicialmente polida após 20 minutos no ensaio de Slurry.

Observando as imagens observadas pelo perfilômetro, conseguimos realizar uma análise um pouco melhor do que somente com os dados numéricos, a visualização da diferença da superfície fica mais clara, observando que a textura em 0 minutos é bem diferenciada, e quando ambas estão em 20 minutos, a textura de ambas fica mais parecidas.

4.CONCLUSÃO

Comparando os resultados para o mesmo material, em ambos os ensaios, verificamos que a rugosidade tem uma influência nos resultados obtidos, sendo que quanto maior a rugosidade inicial da amostra, maior o pico inicial de perda de massa, logo a amostra com maior rugosidade vai começar com uma perda de massa maior que a amostra com menor rugosidade.

Com os resultados gráficos obtidos durante os ensaios, verificamos que a rugosidade inicial interfere na perda de massa apenas no início do ensaio, tendendo a ter uma taxa de perda de massa semelhante no decorrer do tempo de ensaio acumulado, logo com o tempo acumulado de ensaio maior, as amostras tendem a ficar com uma rugosidade igual no final do ensaio, e com uma taxa de perda de massa semelhante.

Com os dados da tabela se observa que a rugosidade final dos ensaios depende do tipo de desgaste superficial da amostra, que independentemente da rugosidade inicial do mesmo material, tende a ficar cada vez mais parecidos ao decorrer do tempo devido ao desgaste, como por exemplo no ensaio de cavitação, no qual a rugosidade final fica muito maior que a rugosidade inicial do material aspergido, porem no ensaio abrasivo, a rugosidade final tende a ficar entre as rugosidades das amostras aspergidas e preparadas.

Comparando os diferentes materiais, observa-se uma maior perda de massa no ensaio de cavitação no revestimento WC10Co4Cr, porem no ensaio Slurry Jet Erosion o Cr_3C_2 25NiCr apresentou uma maior perda de massa. As variações nas rugosidades de ambos os revestimentos apresentaram resultados semelhantes, tanto no ensaio de Slurry, quanto de cavitação.

5.REFERÊNCIAS

- Bertuol, K., 2020. *Estudo do efeito sinérgico cavitação/erosão em revestimentos de carboneto de cromo e tungstênio depositados por aspersão térmica de alta velocidade. Dissertação.* Tese de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Bolelli, G.; Berger, L. M.; Borner, T.; Koivuluoto, H.; Lusvarghi, L.; Lyphout, C.; Markocsan, N.; Matikainen, V.; Nylén, P.; Sassatelli, P.; Trache, R.; Vuoristo, P. 2014. *Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment.* 1 Jul. 2020. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897215000821>>.
- Elkholy, A., 2003. *Prediction of abrasion wear for slurry pump material.* 1 Jul. 2020 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043164883901175>>.
- Wang, Q.; Tang, Z.; Cha, L., 2014. *Cavitation and Sand Slurry Erosion Resistances of WC-10Co-4Cr Coatings.* 4 Dez. 2019 <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-015-1496-z>>.