

REVESTIMENTO PARA ROSCAS HELICOIDAIS AGRÍCOLAS A BASE DE CRC DEPOSITADO VIA HVOF POSTERIORMENTE IRRADIADAS COM LASER DE ND YAG E DE CO₂*

Hortencia Noronha dos Santos¹
Gabriel Angelo Gehrke²
Ana Claudia Costa de Oliveira³

Resumo

Visando melhorias no setor agroindustrial como uma maior eficiência no transporte de grãos e diminuição de manutenção preventiva, o estudo em pauta descreve uma análise entre helicoides de roscas transportadoras de grãos fabricados em aço 1020 sem tratamentos térmicos, e o mesmo aço com uma camada de revestimento cerâmico aspergida via HVOF (*high velocityoxygenfuel*) a base de carboneto de cromo e posteriormente tratadas com lasers de CO₂ e Nd YAG visando a densificação do material. Após a deposição do material destinado ao revestimento e o processo de irradiação a laser, foram realizados ensaios comparativos entre as diferentes amostras. Os resultados obtidos nos ensaios apresentam uma solução para o problema de desgaste de roscas helicoidais presente na indústria de grãos através do revestimento superficial do mesmo aço 1020, visando apresentar um ganho de desempenho satisfatório quando comparado ao uso do material sem tratamentos térmicos, sendo este empregado na composição de helicoides com aplicação no transporte de grãos dentro do setor agroindustrial.

Palavras-chave: Roscas helicoidais; HVOF; Laser de Nd YAG; Laser de CO₂.

COATING OF AGRICULTURAL HELICIDAL THREADS BASED ON CrC DE-
POSITED VIA HVOF POSTERIORLY IRRADIATED WITH LASER Nd YAG AND
CO₂

Abstract

Aiming for improvements in the agroindustry sector as a greater efficiency in grain transport and reduction of preventive maintenance, the study describes an analysis between helicoids of grain conveyor threads made of 1020 steel without heat treatments, and the same steel with a coating layer ceramic sprayed with HVOF (high velocity oxygen fuel) based on chromium carbide and later treated with CO₂ and Nd YAG lasers aiming the densification of the material. After deposition of the coating material and the laser irradiation process, comparative tests were performed between the different samples. The results obtained in the tests sought a solution to the problem of wear of helical threads brought to the grain industry through the surface coating of the same steel 1020 in order to present a satisfactory performance gain in relation to the use of the material without thermal treatments for the composition of helicoids with application in grain transport within the agroindustry sector.

Keywords: Helical threads, HVOF, Nd YAG laser, CO₂ laser.

¹ Engenheira Mecânica, Mestranda, Universidade Federal do Pampa, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, Brasil

- ² *Engenheiro Mecânico, Graduado, Universidade Federal do Pampa, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, Brasil*
- ³ *Engenheira Mecânica, Doutora, Professora, Universidade Federal do Pampa, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, Brasil..*

1 INTRODUÇÃO

Localizados na estrutura funcional de colheitadeiras, graneleiros agrícolas e dispostos de forma aleatória dentro da planta fabril de engenhos e cerealistas, os helicóides são responsáveis por realizar o transporte de grãos de acordo com a necessidade de distribuição do produto. Para o desempenho dessa função, os grãos concentram-se em uma espécie de calha, normalmente constituída de aço galvanizado, para que se torne possível que o helicóide exercer a sua função, transportar de forma horizontal e retilínea os grãos até o ponto de descarregamento. O trabalho de movimentação é realizado pela rotação do helicóide que em um fluxo contínuo, conduz os grãos ao longo da espira por meio do atrito. Dessa forma, o atrito existente no movimento relativo entre o material em transporte e as faces da espiral faz com que haja um desgaste da superfície do material por abrasão, que em muitos casos acarreta em um grande problema para a linha de produção de uma cerealista, visto que para fazer a manutenção corretiva deve-se parar toda a linha de produção.

No contexto de aceleração no processo de desgaste da superfície no material, é passível de destaque de forma impactante e negativa a cultura do arroz, cereal com alto poder de abrasão e que tem influência decisiva na resistência ao desgaste do material a ser utilizado na fabricação da espira. Neste aspecto, a espira dos helicóides é constituída normalmente de aço 1020, que atualmente não resiste suficientemente aos esforços em que são solicitadas.

Para os benefícios ligados ao setor industrial, o presente trabalho justifica-se pela necessidade da redução de manutenção das roscas helicoidais causado pelo desgaste excessivo, esse problema será diminuído aplicando-se uma camada de revestimento cerâmico a base de carbeto de cromo por aspersão térmica, onde o material base é fundido e aspergido sobre a superfície por meio de um fluxo de gás de alta velocidade e temperatura, produzindo um revestimento denso que pode ser deposto com um acabamento superficial muito alto, esse processo é particularmente conhecido como *High VelocityOxygenFuel* (HVOF).

Para aumentar a força de adesão entre o revestimento aspergido e o substrato, serão utilizadas irradiações de laser de NdYAg e CO₂, buscando os melhores parâmetros e optando pelo processo mais eficiente. Esses feixes de laser quando entram em contato com o material, provocam uma densificação visando uma ligação metalúrgica entre revestimento e substrato.

Esse revestimento cerâmico é de suma importância para o desenvolvimento do setor industrial e de máquinas agrícolas, sempre no intuito de melhorar as propriedades mecânicas, a vida útil do equipamento e buscar a diminuição dos custos com manutenção, por consequência, visando maior viabilidade de produção e diminuição dos impactos causados ao meio ambiente desde a fabricação, passando pelo ciclo de vida até o descarte do produto. Dessa forma, como objetivo geral apresentado neste artigo, temos o desenvolvimento de um estudo tribológico do material das roscas transportadoras helicoidais visando à melhoria de suas propriedades mecânicas e consequentemente o seu tempo de vida útil.

2 DESENVOLVIMENTO

Para obtenção dos objetivos propostos neste artigo e relacionar o embasamento teórico com a parte experimental será realizado o estudo tribológico das amostras, que é composto pela análise detalhada das micrografias, o estudo do tamanho dos

grãos do pó e os ensaios mecânicos de desgaste emicrodureza para obtenção da espessura da camada revestida.

2.1 Obtenção do material para análise

Buscando a obtenção do material adequado para realizar os testes presentes no trabalho, foi utilizada uma rosca helicoidal agrícola já desgastada quando solicitada em serviço em uma calha transportadora de arroz, o componente havia sido retirado durante a manutenção corretiva, dessa forma, foi possível a realização do corte de uma fração do material para análise, conforme ilustra a figura 1.

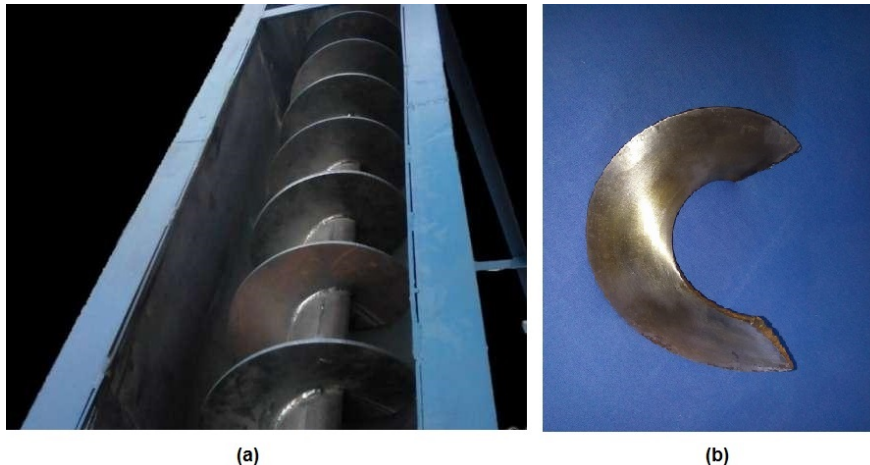


Figura 1. (a) rosca helicoidal transportadora. (b) fração do material cortado para análise.

Foram fabricadas pela empresa Rigeza geradas amostras retangulares cujas dimensões são 60 mm X 22 mm X 10 mm e amostras cilíndricas de 22,4 cm de diâmetro x 38 cm de altura.

2.2 Análise do pó de CrC

Para realizar a análise microestrutural do pó de carbeto de cromo, foi utilizado o MEV, modelo EVO MA10 da marca Zeiss.

2.3 Preparação do revestimento

Após a caracterização do material e confecção dos corpos de prova, os mesmos foram enviados para o laboratório da empresa Rigeza para preparação do substrato e aplicação do revestimento de carboneto de cromo por aspersão térmica HVOF. Para realização do processo, foi utilizado um equipamento de aspersão Praxair-TAFA JP-5000 HP/HVOF, onde o aspersor é acoplado a um braço robótico para obtenção de resultados mais satisfatórios, eliminando o erro humano e evitando poros.

Após o término do processo de aspersão térmica HVOF, os corpos de prova sofreram tratamento com laser de NdYAg, as amostras foram irradiadas por um feixe de laser concentrado, ocorreu uma refusão entre o substrato e o revestimento, densificando o material.

Para realização desse tratamento, foi utilizado um laser de 2 KW de potência média da marca IPG, modelo YLR-2000. Esse equipamento está em funcionamento no Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Lasers e Óptica (DEDALO)

pertencente ao Departamento de Ciência e Tecnologia (DCTA). Os parâmetros estão exibidos na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para aplicação do feixe de laser NdYAg

Potência [W]	600
Velocidade de passe [mm/min]	600
Número de passes	6
Gás utilizado	Argônio
Pressão do gás [l/min]	26

Após realizada a irradiação com laser de NdYAg, para obtenção de novos parâmetros e buscar o melhor resultado obtido com o feixe de diferentes tipos de laser, no mesmo laboratório pertencente ao IEAv, os corpos de prova foram irradiados novamente, agora fazendo o uso de um laser de CO₂ da marca SYN-RAD, modelo Evolution 125.

O sentido de varredura do feixe de laser de CO₂, conforme ilustrado na figura 2, influência na taxa de resfriamento do material irradiado. Quando o sentido de varredura se dá na direção horizontal o resfriamento ocorre de forma mais lenta podendo prevenir o aparecimento de trincas. Já quando o sentido de varredura se dá na direção vertical, ocorre um resfriamento mais rápido pois o laser leva um intervalo de tempo maior para irradiar a superfície posterior ao passe.

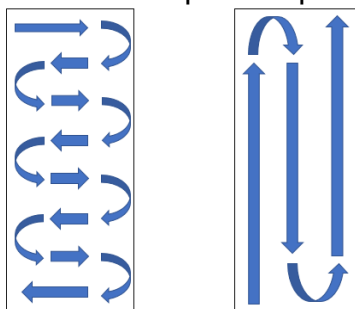


Figura 2. Sentido de varredura do feixe de laser.

A partir dos estudos realizados, buscando o melhor parâmetro para aplicação do laser de NdYAg, foram escolhidas as seguintes configurações mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no laser de CO₂

Potência [W]	100
Velocidade de passe [mm/s]	100
Número de passes horizontais	1
Número de passes verticais	1
Resolução [PPP]	300
Sentido de varredura	Vertical

Após a aplicação dos dois tipos de laser, na direção da maior seção da amostra, ocorre a densificação do revestimento e da camada de ligação do substrato, deixando a superfície da amostra conforme mostrado na figura 3.

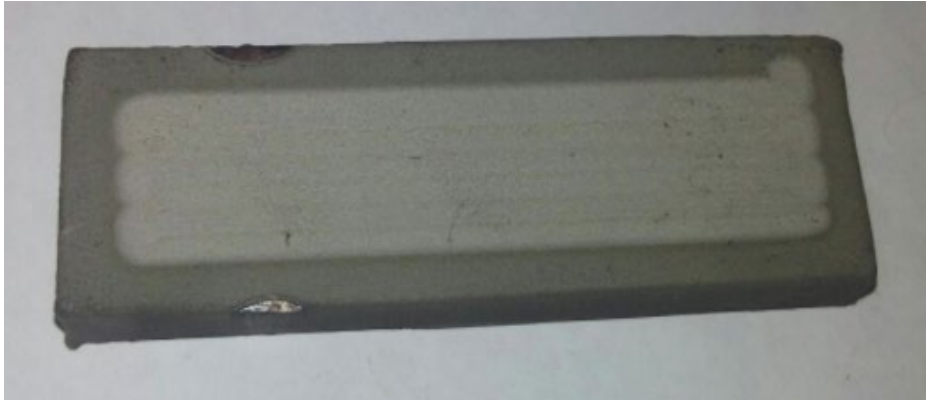


Figura 3. Amostra após a irradiação a laser.

2.4 Análise metalográfica

A análise metalográfica das amostras foi realizada no laboratório de Química e Metalografia da Unipampa, onde o material foi submetido a corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico, posteriormente sendo realizadas as micrografias.

Após a realização de todo o processo de preparo da amostra, esta foi colocada sob a lente de um microscópio marca Kontrol, modelo IM713 que com auxílio de uma câmera fotográfica acoplada ao equipamento, foram captadas imagens que ilustram o substrato e o revestimento aspergido.

Na figura 4 observa-se o tamanho do revestimento, que varia conforme ponto analisado, porém, através de uma média dos pontos analisados, a espessura do revestimento é aproximadamente 200 μm .

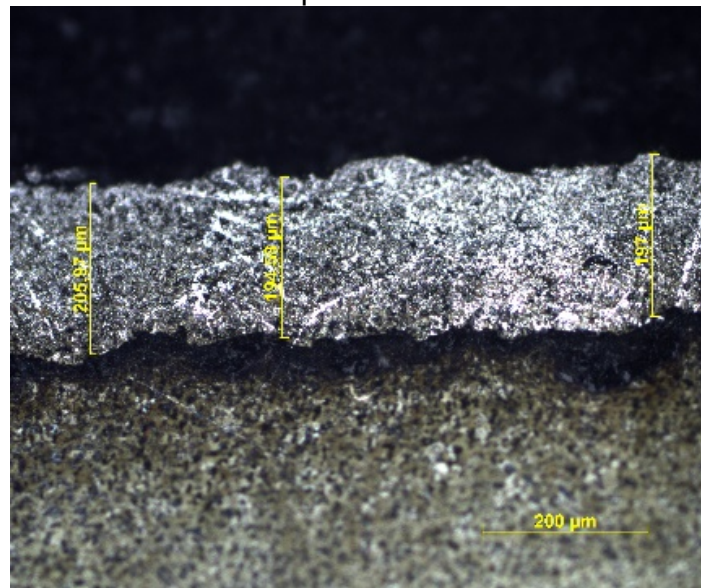


Figura 4. Microscopia óptica.

2.5 Perfil de microdureza

Para obtenção dos valores da microdureza do material, foi empregado um microdurômetro marca Buehler, modelo MicroMet 6010. Para medição do perfil de microdureza, foi aplicada uma carga de 500g, durante um tempo de 10 segundos. As endentações feitas na amostra foram realizadas da superfície aspergida até o

substrato sem qualquer tratamento, elas distanciaram entre si numa ordem de 50 μ m, de forma que fossem distribuídas 4 endentações no revestimento, duas endentações no aço 1020 e uma endentação na zona de ligação entre as duas.

A figura 5 mostra os perfis de microdureza das medições realizadas nos corpos de prova, sendo exibidos seus valores médios e desvio padrão.

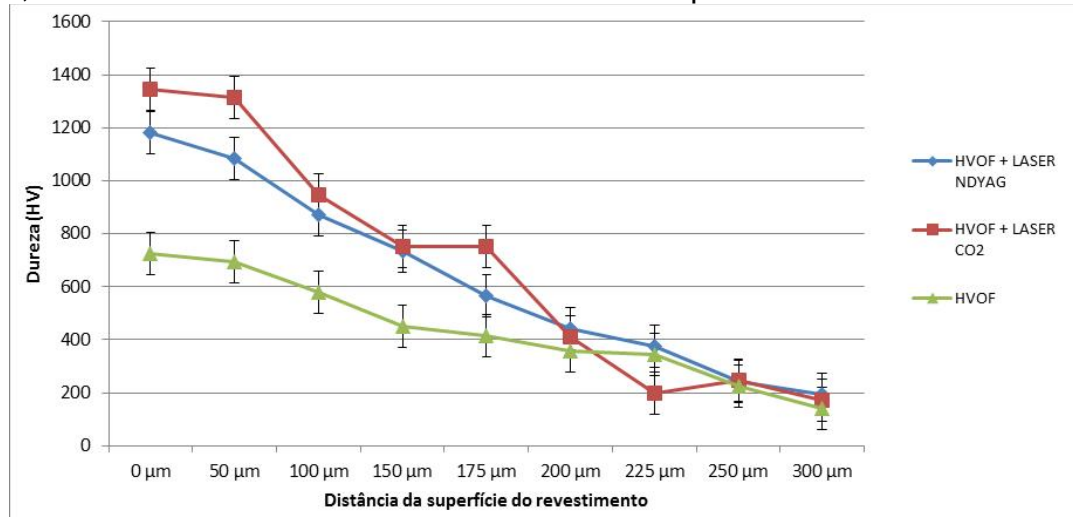


Figura 5. Perfil de microdureza

Analisando os dados experimentais e o gráfico gerado para as microdurezas do revestimento com irradiação a laser de CO₂, percebe-se que a amostra apresentou melhoria na dureza superficial, chegando a uma média de 1344,8 HV, valor esse que foi superior ao corpo de prova irradiado com laser de NdYAg. Conforme o indutor foi se distanciando da superfície esse valor foi diminuindo, porém, as quatro endentações que ficaram acima da região de ligação apresentaram altos valores de dureza, todos superiores a 750 HV e as duas endentações realizadas no substrato apresentaram valores inferiores a 250 HV.

Para o perfil aspergido sem irradiação a laser, nota-se melhoria na dureza superficial da amostra, porém inferior em relação as demais amostras. Próximo da superfície, o valor encontrado foi de 724,8 HV, diminuindo em função do deslocamento do indutor em direção ao núcleo do substrato.

2.6 Ensaio de desgaste

Com o objetivo de mensurar a melhoria da resistência ao desgaste do revestimento, foram feitas medições tanto para o aço 1020, quanto para o aço 1020 com revestimento HVOF e por último para o aço 1020 com revestimento HVOF e laser de NdYAg. Para realização do ensaio de desgaste foi utilizado o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM.

Após um estudo prévio e análise de ensaios realizados anteriormente, os parâmetros utilizados para realização do ensaio são mostrados na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para o ensaio de desgaste

Dímetro do disco de desgaste [mm]	60
Carga aplicada [kg]	5
Número de ciclos	350
Granulometria da lixa	120

[grãos/pol ²]	
Velocidade [RPM]	50
Força [N]	287

Para calcular o quanto o corpo de prova desgastou durante o ensaio, é necessário fazer o cálculo de perda de massa, conforme mostrado na equação 1 abaixo.

$$Pm = mi - mf(1)$$

Onde:

pm – Perda de massa

mi – Massa do corpo de prova antes do ensaio de desgaste

mf – Massa do corpo de prova após o ensaio de desgaste

Para obter a massa exata de cada corpo de prova, foi necessária a utilização de uma balança de precisão com resolução de 0,001g, da marca Shimadzu modelo AY220.

A realização do ensaio de desgaste comparou três corpos de prova, uma amostra de aço 1020, uma de aço 1020 com revestimento de CrC e outra também de aço 1020 com revestimento de CrC porém com irradiação a laser de NdYAg. A amostra de aço 1020 com revestimento de CrC irradiada com laser de CO₂ não foi ensaiada no teste de desgaste pois não apresentou uma qualidade satisfatória no recobrimento, ficando quebradiço e com muito deslocamento.

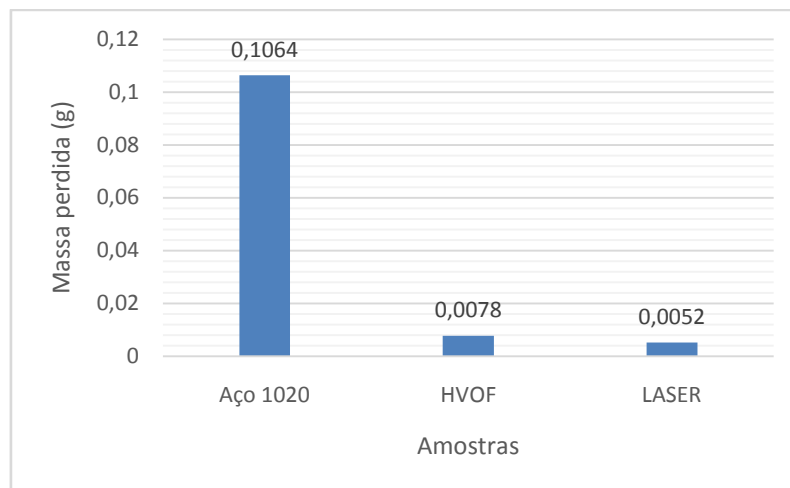


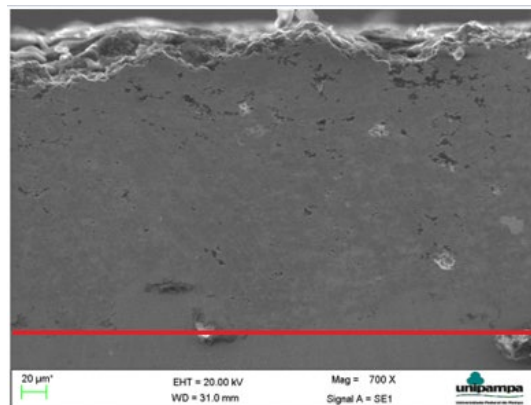
Figura 6. Gráfico comparativo do ensaio de desgaste

Analisando o gráfico da Figura 6 resultante dos dados obtidos no ensaio de desgaste, podemos observar que o aço 1020, possui uma resistência muito baixa, perdendo 0,1064 g de massa durante o teste, esse mesmo aço quando revestido com uma camada de CrC via HVOF, apresentou uma melhora muito satisfatória, perdendo apenas 0,0078 g. Por último, a amostra irradiada com laser de NdYAg foi a que apresentou a melhor resistência ao desgaste, perdendo apenas 0,0052 g durante o ensaio.

2.7 Microscopia eletrônica de varredura

Afim de se realizar um estudo mais preciso do melhor parâmetro de irradiação do laser, assim como, fazer uma análise mais exata da região de ancoramento do revestimento aspergido no substrato, é utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

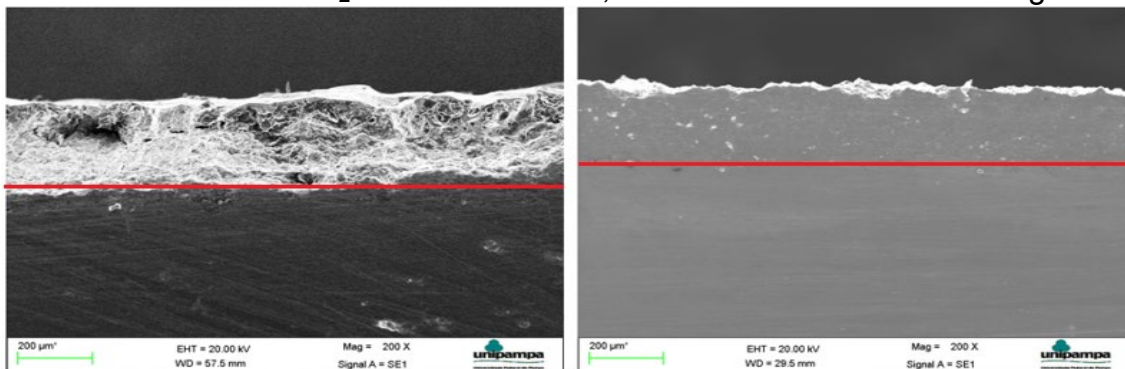
As figuras 7 e 8 mostram a interface de ligação entre o revestimento e o substrato. Na parte superior da linha vermelha é a região do revestimento e na parte inferior o substrato.



(a) HVOF

Figura 7.MEV com ampliação de 700x aspergida via HVOF.

Analisando a figura 7, podemos observar que o revestimento aspergido via HVOF sem a aplicação de laser (figura 7) se mantém bastante homogêneo, sem trincas e com porosidade muito baixa. É possível observar uma maior interação entre revestimento e substrato após tratamento com laser. A figura 8 mostra uma comparação entre a amostra com o revestimento de CrC aspergido via HVOF e irradiado com laser de CO₂ e a outra amostra, irradiada com laser de NdYAg.



(a) HVOF + LASER CO₂

(b) HVOF + LASER Nd YAg

Figura8. Comparação dos tratamentos com laser de CO₂ e Nd YAG.

Podemos observar que o CrC não apresentou bons resultados quando irradiado com laser de CO₂, visto que é um laser no estado gasoso e o elemento ativo é a molécula de dióxido de carbono, que emite um feixe com comprimento de onda de 10,6 µm e dificilmente é absorvido pelo corpo de prova. Já o laser de NdYag, apresentou resultados completamente satisfatórios, pois, é um laser no estado sólido cujo elemento ativo é o íon de neodímio e emite um comprimento de onda de 1,06 µm e apresentando um alto nível de absorção pelo corpo de prova, gerando uma densificação do revestimento e de parte do substrato. Onde foi aplicado o laser de NdYAg, percebemos uma melhora satisfatória, onde é notável a diminuição dos poros, bem como a densificação da camada, apresentando um melhor acabamento superficial, com uma melhor aderência ao substrato.

3 CONCLUSÃO

Após a apresentação dos resultados, podemos retirar conclusões sobre o estudo:

- I. Com a análise da espessura da camada revestida de CrC foi possível observar, através de microscopia óptica que a camada protetora manteve uma espessura regular de 200 μm e homogênea durante todo o comprimento da superfície da amostra, apresentou baixa porosidade e uma boa adesão ao substrato, tudo isso devido a sua aplicação ter sido realizada por um braço robótico que apresenta melhor acabamento final que quando aplicada manualmente.
- II. Analisando o pó de CrC com auxílio do microscópio eletrônico de varredura, pode-se observar um diâmetro médio inferior a 40 μm dos elementos constituintes, apresentando uma boa aderência das partículas aspergidas, devido à alta temperatura e velocidade, essas partículas pré-fundidas se chocam com o substrato formando um ancoramento físico e metalúrgico com baixa presença de óxidos e poros.
- III. Com a irradiação por laser de NdYAg sobre a camada aspergida de CrC, houve uma melhoria superficial no revestimento, bem como uma homogeneização notável e uma diminuição nos poros e lamelas, como pode ser observado nas microscopias eletrônicas apresentadas, dessa forma, o revestimento passou a ter uma ligação metalúrgica com o substrato, melhorando a sua resistência ao deslocamento quando solicitado em serviço.
- IV. Os corpos de prova irradiados com laser de CO_2 não apresentaram os resultados esperados, a interação não homogeneizou o material, mas o deixou mais duro e quebradiço, deslocando a camada depositada durante o processo de lixamento para preparação metalográfica.
- V. Após análise dos dados obtidos experimentalmente e dos gráficos gerados para o perfil de microdureza das três amostras comparadas, podemos observar o grande diferencial da aplicação da camada revestida de CrC, que elevou a dureza média do substrato de aço 1020 que era de 170 HV para uma média de 700 HV na superfície, podendo utilizar um material simples e barato que se mostra dúctil no seu núcleo com uma camada aspergida de elevadas propriedades mecânicas. Com a irradiação do laser, essa microdureza se mostrou maior ainda, fechando alguns poucos poros existentes e densificando o material, o revestimento passou a ser mais denso e por consequência mais duro.
- VI. O ensaio de desgaste é o que mostrou os resultados mais satisfatórios, visto que a aplicação desse revestimento é em roscas helicoidais agrícolas para o transporte de arroz, as áreas dos helicoides estão sempre em meio abrasivo, necessitando assim uma alta resistência ao desgaste. Com a camada de CrC aspergida, obtemos uma melhora de 92,67% quando comparada a uma amostra de aço 1020, se mostrando muito eficiente para aplicação na indústria agrícola. Essa melhora na resistência ao desgaste aumenta para 95,11% quando irradiado um laser de NdYAg sobre o revestimento, porém, devido ao alto custo do equipamento de irradiação a laser, somente o revestimento via HVOF já é suficiente para aplicação em roscas helicoidais comerciais. Dessa forma, a amostra revestida apresentou uma melhora de 13,6 vezes quando comparada ao aço 1020 sem revestimento que é utilizado nas roscas helicoidais comercializadas hoje em dia.

REFERÊNCIAS

- 1 G. A. Gehrke, Revestimento de roscas helicoidais agrícolas a base de CrC depositado via HVOF posteriormente irradiadas com laser de Nd YAG e de CO₂. Universidade do Pampa, UNIPAMPA, 2016.
- 2 DUSA, K. M; Spraytime Magazine: ITSA historical collection growing. ASM International/TSS – Thermal Spray Society, ITSA. 2001, vol 8. N° 2.
- 3 CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: Processos de fabricação e tratamento; volume 2. São Paulo. Ed. mcgraw-hill, 2015.
- 4 CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos; Ed. Associação Brasileira de Metais. 2002.
- 5 TAKIMI, A; POSSAMAI, L; BERGMANN, C. P. Revestimentos depositados por aspersão térmica hiper-sônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro. LACER Laboratório de Materiais Cerâmicos. Departamento de Materiais Escola de Engenharia UFRGS.
- 6 BUSANELLO, M. W. Estudo de desgaste na superfície de helicoides tratados por têmpera por indução e cromagem. FAHOR. Horizontina. 2012.
- 7 MILMAN, M. J. Equipamentos para pré-processamento de grãos. Pelotas. Editora e Gráfica Universitária. UFPel. 2002.
- 8 PAREDES, Ramón S. C. Aspersão térmica. UFPR. Curitiba, 2012
- 9 LIMA, Carlos C; TREVISAN, Roseana. Aspersão térmica – fundamentos e aplicações; 2ª ed. Editora Ar-tliber. 2007
- 10 MILMAN, Mário J. Equipamentos para pré-processamento de grãos; 1ª Ed. Editora e Gráfica Universitária – UFPEL, 2002.
- 11 PAWLOWSKI, L. The Science and Engeneering of Thermal Spray Coatings – 2ª Ed. John Wiley& Sons, Ltd. ISBN, 2008
- 12 UPADHYAYA, G. S. Materials science of cemented carbides – An overview. MaterialsandDesing, v. 22, p. 483-489, Elsevier, 2001
- 13 Branco, J. R. T.; Campos, S. V. Surf.Coat.Tech., 120-121, p.476, 1999
- 14 KAWAKITA, J.; KURODA, S.; KODAMA, T. Evaluation of Through-Porosity of HVOF Sprayed Coatings. SurfaceandCoatings Technology V. 166, p. 17-23, mar 2003
- 15 SIQUEIRA, R. Soldagem a laser autógena em passe único de juntas de alumínio AA 6013-T4 com alta resistência mecânica. Instituto tecnológico da Aeronáutica (ITA), 2016
- 16 TELEGINSKI, V. Deposição de revestimentos com laser de CO₂ para proteção térmica de palhetas de turbinas aeronáuticas e industriais. Instituto tecnológico da Aeronáutica (ITA), 2016
- 17 American Welding Society, Thermal Spraying – practice, theory and applications, Miami, FL, USA, 1985