

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GABRIEL ANGELO GEHRKE**

**REVESTIMENTO DE ROSCAS HELICOIDAIS AGRÍCOLAS A BASE DE CrC  
DEPOSITADO VIA HVOF POSTERIORMENTE IRRADIADAS COM LASER  
DE Nd YAG E DE CO<sub>2</sub>**

**Alegrete**

**2017**

**GABRIEL ANGELO GEHRKE**

**REVESTIMENTO DE ROSCAS HELICOIDAIS AGRÍCOLAS A BASE DE CrC  
DEPOSITADO VIA HVOF POSTERIORMENTE IRRADIADAS COM LASER  
DE Nd YAG E DE CO<sub>2</sub>**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Orientadora: Ana Claudia Costa de Oliveira

**Alegrete  
2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

G311r Gehrke, Gabriel Angelo

REVESTIMENTO DE ROSCAS HELICOIDAIS AGRÍCOLAS A  
BASE DE CrC DEPOSITADO VIA HVOF POSTERIORMENTE  
IRRADIADAS COM LASER DE Nd YAG E DE CO2 / Gabriel  
Angelo Gehrke.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA,  
2017.

"Orientação: Ana Claudia Costa de Oliveira".

1. Revestimentos cerâmicos. 2. Aspersão térmica.  
3. Desgaste por abrasão. I. Título.

**GABRIEL ANGELO GEHRKE**

**REVESTIMENTO DE ROSCAS HELICOIDAIS AGRÍCOLAS A BASE DE CrC  
DEPOSITADO VIA HVOF POSTERIORMENTE IRRADIADAS COM LASER  
DE Nd YAG E DE CO<sub>2</sub>**

**Trabalho de Conclusão de Curso**  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27/11/2017

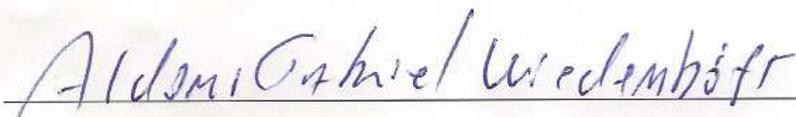
Banca examinadora:



Prof.ª. Dr.ª. Ana Claudia Costa de Oliveira

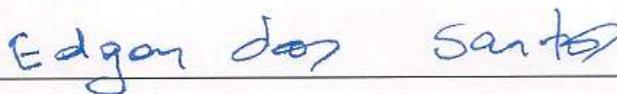
Orientadora

UNIPAMPA



Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

UNIPAMPA



Prof. Dr. Edgar Gonzaga Souza dos Santos

UNIPAMPA

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho principalmente a meu pai Léo e minha mãe Vaneti que sempre estão presentes me apoiando, independentemente da situação, às minhas irmãs, Verlaine e Vivian, a minha namorada Natália, a minha vó Silvia e aos meus amigos os quais sempre estiveram ao meu lado em todas as horas durante minha graduação.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me dar saúde e forças para seguir em busca do meu sonho.

Aos meu pais, Léo e Vaneti, por sempre me apoiarem independentemente da situação, em todas as vezes em que pensei em desistir, eles sempre estavam lá me dando forças para seguir, sem cobrança excessiva e entendendo o quão árduo é para mim esse período de graduação.

A minha vó Silvia e minhas irmãs Verlaine e Vivian, por toda a ajuda e confiança depositada em mim durante esse período.

A minha namorada, Natália, pelo companheirismo e apoio incondicional tanto nas horas boas quanto nas horas ruins, tanto nas aprovações quanto nas reprovações, enfim, sempre estando ao meu lado.

A todos os meus amigos, principalmente, ao Lucas e ao Jaimer pela amizade de longa data, desde criança que segue até os dias de hoje, sempre que possível, juntos para alguma atividade de lazer. Agradeço também ao João, Pedro, Jonatan entre outros colegas, amigos da graduação e companheiros de moradia que o Alegrete me trouxe.

A minha orientadora, Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Costa de Oliveira pelos ensinamentos e empenho durante o desenvolvimento desse trabalho, sempre me ensinando novas técnicas, teorias e abrindo as portas para um maior conhecimento fora da Unipampa.

Aos Professores do IEAv, Getúlio, Milton e Silvelene pelo acolhimento e ensinamentos compartilhados no período em que passei em São José dos Campos.

Aos técnicos da Unipampa, pelo auxílio e paciência para explicar o uso dos equipamentos utilizados nos laboratórios da Unipampa.

**" Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e ele o fará"**

**Salmos 37:5**

## **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 velocity oxygen fuel) a base de carboneto de cromo e posteriormente tratadas com lasers de CO<sub>2</sub> 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: Aspersão térmica, Roscas helicoidais, HVOF, Laser de Nd YAG, Laser de CO<sub>2</sub>.

## **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 CO<sub>2</sub> 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: Sprinkler, Helical threads, HVOF, Nd YAG laser, CO<sub>2</sub> laser.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de roscas transportadoras helicoidais. (Fonte: Mário José Milman).....	3
Figura 2 - Eixos do helicóide. (Fonte: Mário José Milman) .....	4
Figura 3 - Detalhamento do helicóide (Fonte: Mário José Milman) .....	4
Figura 4 - Principais aplicações das roscas helicoidais no transporte de grãos. (Fonte: Montagem de própria autoria) .....	5
Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de aspersão térmica. (Fonte: BRANCO, J.R.) .....	6
Figura 6 - Esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica. (Fonte: Comersul – Aspersão Térmica e Soldas Especiais).....	7
Figura 7 - Estrutura do revestimento. (Fonte: Adaptado de Vietnam Academy of Science and Technology) .....	7
Figura 8 - Seção transversal de um revestimento aspergido. (Fonte: Infosolda) .....	8
Figura 9 - Classificação dos processos de aspersão térmica. (Fonte: Própria autoria).....	9
Figura 10 - Esquema da pistola nos diferentes tipos de aspersão por plasma. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes).....	9
Figura 11 - Esquema do processo a arco elétrico. (Fonte: BERNDT e BERNECKI, 2004) .....	11
Figura 12 - Esquema de aspersão térmica a chama de pós. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes) .	12
Figura 13 - Esquema de aspersão térmica por chama de arame. (Fonte: MARQUES - 2003) ...	12
Figura 14 - a) Esquema de uma tocha de AT supersônico HVOF tipo convergente divergente. b) Esquema do tipo de pistola com câmara venturi. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes).....	13
Figura 15 - Pistola de aspersão térmica HVOF em funcionamento. (Fonte: Plasma Coatings)..	14
Figura 16 - Esquema de instalações para o funcionamento do processo HVOF. (Fonte: HOWARD) .....	15
Figura 17 - Fluxograma de preparação das amostras. (Fonte: Própria autoria) .....	18
Figura 18 - Fluxograma da parte experimental. (Fonte: Própria autoria).....	18
Figura 19 - (a) rosca helicoidal transportadora. (b) fração do material cortado para análise. (Fonte: Própria autoria) .....	19
Figura 20 - Amostras enviadas pela metalúrgica Rijeza (Fonte: Própria autoria).....	19
Figura 21 - Imagem da análise do pó de CrC com ampliação 500x. (Fonte: Própria autoria) ....	20
Figura 22 - Pistola aspersora HVOF acoplada a braço robótico (Fonte: Rijeza Metalurgia).....	21
Figura 23 - Esquema de irradiação do feixe de laser Nd YAg (Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, R.).....	21
Figura 24 - Aplicação do feixe de laser. (Fonte: TELEGINSKI, V.).....	22
Figura 25 - Laser de CO2 utilizado para o revestimento. (Fonte: Própria autoria).....	23
Figura 26 - Fator de sobreposição (SANTOS, C.) .....	23
Figura 27 - Sentido de varredura do feixe de laser (Fonte: Própria autoria) .....	24
Figura 28 - Amostra após a irradiação a laser (Fonte: Própria autoria) .....	25
Figura 29 - Procedimento para realização da análise metalográfica (Fonte: Própria autoria)....	25
Figura 30 - Cortadora de precisão (Fonte: Própria autoria) .....	26
Figura 31 - Embutidora digital (Fonte: Própria autoria) .....	27
Figura 32 - Lixadeira manual (Fonte: Própria autoria) .....	27
Figura 33 - Pano de polimento (Fonte: Própria autoria) .....	28
Figura 34 - Microscópio óptico (Fonte: Própria autoria) .....	28
Figura 35 - Microdurômetro (Fonte: Própria autoria) .....	29
Figura 36 - Local das endentações para medição do perfil de microdureza (Fonte: Própria autoria) .....	30

Figura 37 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de desgaste (Fonte: Própria autoria) .....	30
Figura 38 - Detalhes do equipamento de ensaio de desgaste. (Fonte: Própria autoria).....	31
Figura 39 - Balança Shimadzu utilizada para medição da massa. (Fonte: Própria autoria).....	32
Figura 40 - Microscópio eletrônico de varredura (Fonte: Própria autoria) .....	33
Figura 41 - Calowear (Fonte: Própria autoria) .....	33
Figura 42 - Esquema Calowear (Fonte: TELEGINSKI, V.) .....	34
Figura 43 - Calota gerada pelo Calowear (Fonte: TELEGINSKI, V.).....	34
Figura 44 - Calota gerada no ensaio de abrasão. (Fonte: Própria autoria) .....	35
Figura 45 - Microscopia óptica. (Fonte: Própria autoria).....	36
Figura 46 - Análise do pó de CrC indicando o diâmetro do elemento com ampliação 500x. (Fonte: Própria autoria) .....	37
Figura 47 - MEV do pó de CrC com ampliação 1000x (Fonte: Própria autoria) .....	38
Figura 48 - MEV com ampliação 200x (Fonte: Própria autoria) .....	38
Figura 49 - MEV com ampliação de 500x. (Fonte: Própria autoria).....	39
Figura 50 - MEV com ampliação de 700x. (Fonte: Própria autoria).....	39
Figura 51 - Comparação ente laser de CO2 e Nd YAg. (Fonte: Própria autoria) .....	40
Figura 52 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF + laser Nd YAg. (Fonte: Própria autoria) 41	
Figura 53 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF + laser CO2. (Fonte: Própria autoria).....	43
Figura 54 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF. (Fonte: Própria autoria) .....	44
Figura 55 - Gráfico comparativo do ensaio de desgaste. (Fonte: Própria autoria).....	45
Figura 56 - Helicoide com revestimento a base de CrC nas bordas. (Fonte: Própria autoria) ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das características dos processos de aspersão térmica (Fonte: THORPE)	16
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para aplicação do feixe de laser (Fonte: Própria autoria)	22
Tabela 3 - Parâmetros utilizados no laser de CO <sub>2</sub> (Fonte: Própria autoria)	24
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para realização do ensaio de desgaste (Fonte: Própria autoria)	31
Tabela 5 - Medidas da calota após ensaio de abrasão (Fonte: Própria autoria)	35
Tabela 6 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF + Laser Nd YAg (Fonte: Própria autoria)	41
Tabela 7 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF + Laser CO <sub>2</sub> (Fonte: Própria autoria)	42
Tabela 8 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF (Fonte: Própria autoria)	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

CrC - Carboneto de cromo

EDS - Energy dispersive x-ray

HV - Vickers hardness

HVAF - High velocity air fuel

HVIF - Hipersonic velocity impact forging

HVOF - High velocity oxygen fuel

MEV - Microscópio eletrônico de carredura

Nd - Neodímio

SAE - Society of automotive engineers

YAg - Granada de Ítrio e Alumínio

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Objetivo geral.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.4 Justificativa .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Roscas helicoidais .....	3
2.2 Revestimento cerâmico por aspensão térmica .....	6
2.2.1 Aspensão térmica elétrica por plasma.....	9
2.2.2 Aspensão térmica elétrica por arco elétrico .....	10
2.2.3 Revestimento por aspensão térmica a combustão por chama .....	11
2.2.4 Revestimento por aspensão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF) .....	13
2.2.5 Carbetto de cromo (CrC).....	16
2.3 Laser de Nd-YAG e Laser de CO <sub>2</sub> .....	16
3. METODOLOGIA .....	17
3.1 Obtenção do material para análise.....	18
3.2 Análise do pó de CrC .....	19
3.3 Aspensão térmica HVOF .....	20
3.4 Irradiação com laser de Nd-YAg .....	21
3.5 Irradiação com laser de CO <sub>2</sub> .....	22
3.6 Análise metalográfica.....	25
3.6.1 Corte .....	25
3.6.2 Embutimento .....	26
3.6.3 Lixamento, polimento e ataque químico .....	27
3.6.4 Micrografias .....	28
3.7 Perfil de microdureza .....	29
3.8 Ensaio de desgaste.....	30
3.9 Microscopia eletrônica de varredura .....	32
3.10 Ensaio de abrasão (Calowear) .....	33

4. RESULTADOS OBTIDOS.....	35
4.1 Calowear .....	35
4.2 Microscopia Óptica .....	36
4.3 Análise do pó de CrC .....	37
4.4 Análise da interface do revestimento .....	38
4.5 Perfil de Microdureza.....	40
4.6 Ensaio de Desgaste.....	44
4.7 Estudo da viabilidade econômica.....	46
5. CONCLUSÕES.....	47
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

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 resistem 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 carbetos 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 depositado com um acabamento superficial muito alto, esse processo é particularmente conhecido como High Velocity Oxygen Fuel (HVOF).

Para aumentar a força de adesão entre o revestimento aspergido e o substrato, serão utilizadas irradiações de laser de Nd YAg e CO<sub>2</sub>, 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 em questão, 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.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um estudo tribológico do material das roscas transportadoras helicoidais visando à melhoria de suas propriedades mecânicas e conseqüentemente o seu tempo de vida útil.

## **1.3 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, têm-se:

- Realizar o processo de revestimento por aspensão térmica HVOF em uma fração do material para realização dos testes;
- Realizar irradiação do feixe de laser Nd-YAg e CO<sub>2</sub> sobre a camada de revestimento;
- Realizar ensaios metalográficos para análise da interface entre o aço 1020 e o revestimento de carbetos de cromo;
- Realizar ensaios de desgaste e perfil de microdureza;
- Analisar a viabilidade econômica para a aplicação das roscas revestidas no lugar das roscas convencionais de aço 1020 sem tratamentos térmicos.

## **1.4 Justificativa**

Conforme Maranhão (2006) a utilização de revestimentos protetores aplicados através da Aspensão Térmica tem como objetivo a proteção de peças e componentes contra desgaste abrasivo, adesivo, erosivo e corrosão. Também é utilizada em peças que necessitam de isolamento térmico e isolamento elétrico. Dessa forma, a justificativa do presente trabalho é a análise da

interface do revestimento cerâmico com e sem irradiação do laser em contato com o substrato de aço 1020, visando seu melhor desempenho e a melhoria das suas propriedades mecânicas quando solicitados em serviço entrando em contato com grãos responsáveis pelo desgaste da sua superfície.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Roscas helicoidais

Também conhecidos como transportador de parafuso, o helicóide é um dos mais antigos e versáteis tipos de mecanismos para transportar materiais, como parafuso de Arquimedes, conforme chamado na antiguidade, era utilizado na elevação de água.

Segundo Milman (2002), o transportador denominado rosca transportadora, ou caracol, (Figura 1), é um equipamento que se destina ao transporte tanto horizontal como inclinado, sendo que o sentido de transporte dependerá do sentido de rotação e do tipo do helicóide (passo esquerdo ou direito), onde o transporte dos grãos se dá por arraste.

É constituído basicamente por um tubo ou calha, dentro do qual se localiza o helicóide, que é montado sobre um eixo que se apoia nas extremidades em mancais de rolamento auto compensadores de rolo, e na parte intermediária, em mancais de deslizamento, conforme mostra a Figura 1(a).

Uma rosca transportadora móvel, costuma-se denominar de "chupim", conforme é mostrada na Figura 1(b).

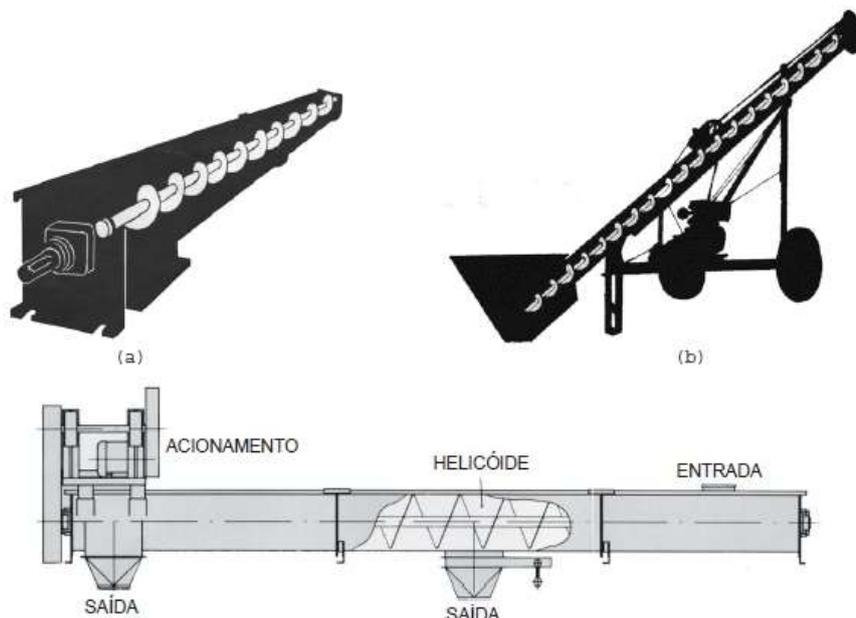


Figura 1 - Ilustração de roscas transportadoras helicoidais. (Fonte: Mário José Milman)

As roscas transportadoras estão projetadas para capacidades de até 275 ton/h de soja e 220 ton/h de arroz, podendo possuir comprimento de até 45 metros dependendo da potência instalada. São compostas basicamente por acionamento com moto redutor, calhas, helicoides, mancais intermediários, mancais finais e cobertura com fecho rápido.

Os eixos das roscas são tubos mecânicos com diâmetro externo compatível com o diâmetro interno do helicóide, tendo nas extremidades as pontas de eixos (Figura 2).



Figura 2 - Eixos do helicóide. (Fonte: Mário José Milman)

Os helicóides são fitas de chapas de aço (Figura 3), que sofrem um processo de perfilação, que deve deixar uma espessura, na borda externa, de no mínimo 4 milímetros.

Caracteriza-se pelo passo (esquerdo ou direito), diâmetro externo e diâmetro interno. Para grãos, usa-se o passo igual ao diâmetro externo do helicóide. A folga máxima entre o sem-fim e a calha ou tubo, deve ser de 5 a 10mm, para não causar quebra nos grãos.

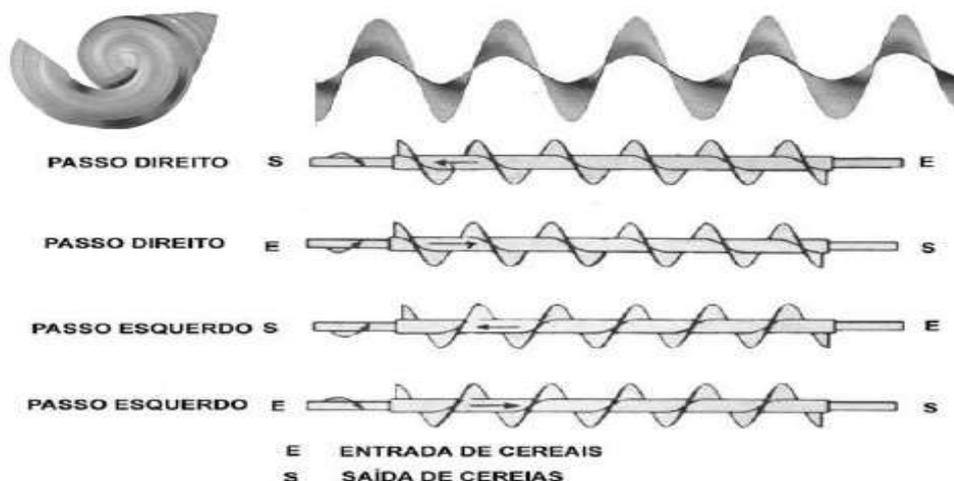


Figura 3 - Detalhamento do helicóide (Fonte: Mário José Milman)

Dentro do agronegócio, os helicoides são peças fundamentais quando se trata de transporte de grãos, a sua aplicação não está destinada somente a roscas transportadoras

de cerealistas, mas também a canos de colheitadeiras, canos de descarga de graneleiros, roscas varredoras de silos e diversos outros equipamentos (Figura 4) quando se faz necessário o transporte de grãos.



Figura 4 - Principais aplicações das roscas helicoidais no transporte de grãos. (Fonte: Montagem de própria autoria)

Uma alternativa para solucionar o problema do desgaste excessivo ocorrido nas roscas helicoidais pelo atrito dos grãos, é realizar um tratamento térmico na superfície do helicoide, para dessa forma, aumentar a dureza e principalmente a resistência ao desgaste desse componente mecânico. Os dois tipos de tratamentos superficiais comumente vistos, ou que podem ser aplicados no meio agroindustrial são: têmpera por indução ou processo de eletrodeposição de cromo duro (cromagem), porém, ambos processos apresentam muitas desvantagens, tanto relacionadas ao método de aplicação, quanto a durabilidade do tratamento. Então, surge a necessidade de utilizar um método mais recente e eficaz para redução do desgaste superficial desses elementos. A partir disso, é implantado o método de revestimento cerâmico por aspersão térmica.

## 2.2 Revestimento cerâmico por aspersão térmica

Aspersão térmica é um grupo de processos onde materiais metálicos ou não-metálicos, finamente divididos, são aspergidos em uma condição fundida ou semi-fundida sobre um substrato preparado, formando assim, um depósito aspergido. O material de revestimento pode estar na forma de pó, vareta ou arame.

O calor necessário para fundir o material de revestimento é gerado em uma pistola de aspersão através da formação de um arco elétrico ou da queima de gases combustíveis (Figura 5).

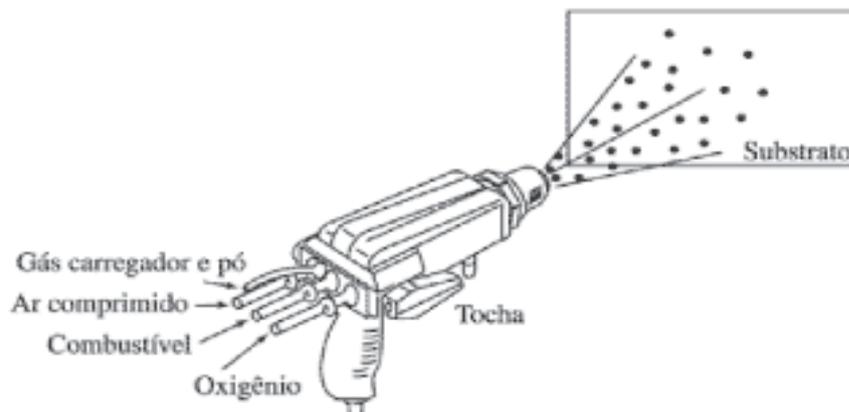


Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de aspersão térmica. (Fonte: BRANCO, J.R.)

Quando os materiais sólidos são aquecidos, mudam para um estado plástico ou fundido. Neste estado são impelidos, pela ação de um gás comprimido, contra a superfície de uma peça de trabalho. As partículas se colidem com alta velocidade contra a superfície da peça de trabalho, tornando-se aplainadas e aderindo as irregularidades desta superfície previamente preparada.

De acordo com Lima e Trevisan (2007), a ligação entre o depósito aspergido e o substrato pode ser mecânica, metalúrgica, química, física ou uma combinação dessas formas. As variações básicas da aspersão térmica ocorrem nos materiais utilizados nos métodos de aquecimento e de propulsão dos materiais para o substrato. Muitos metais, cerâmicas, compostos intermetálicos, alguns plásticos orgânicos e certos vidros podem ser depositados por um ou mais processos de aspersão de aspersão térmica.

Um esquema geral é mostrado na Figura 6.

## Processo de Aspersão Térmica



Figura 6 - Esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica. (Fonte: Comersul – Aspersão Térmica e Soldas Especiais)

As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e da velocidade imposta às partículas que pelas sucessivas deposições formam camadas lamelares com óxidos e poros (Figura 7).

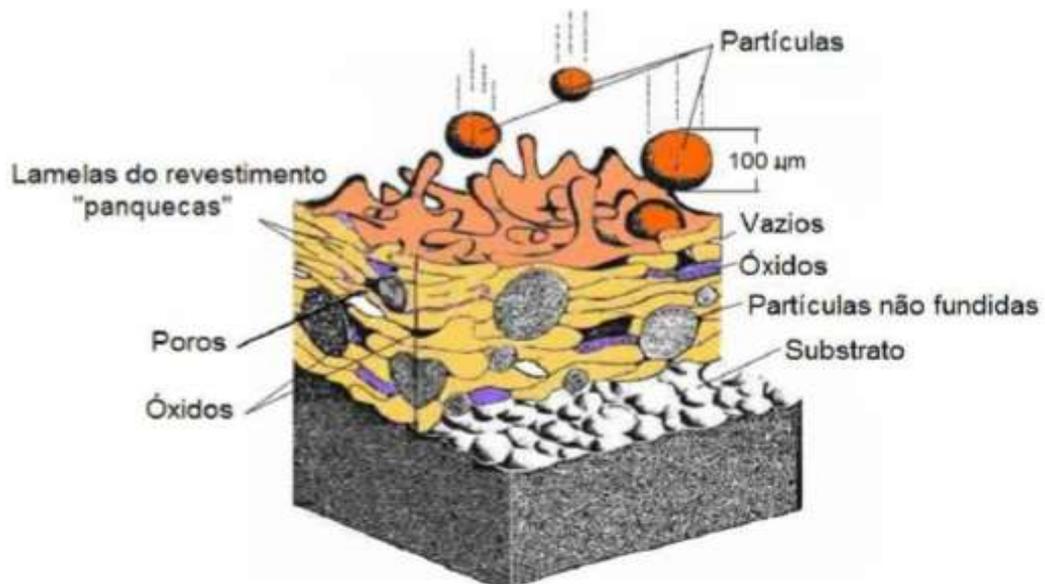


Figura 7 - Estrutura do revestimento. (Fonte: Adaptado de Vietnam Academy of Science and Technology)

A estrutura dos revestimentos aplicados por aspersão térmica é formada por lamelas sobrepostas, que são oriundas do espelhamento das partículas do pó fundidas, ou semi-fundidas, quando do impacto com o substrato.

O revestimento é formado pela ocorrência do mesmo mecanismo nas camadas subsequentes, pois o tempo de solidificação é muito menor que o tempo de projeção das partículas, que é de 0,01s. Outra particularidade dessa alta taxa de resfriamento é a

possibilidade de revestir materiais com menores temperaturas de fusão em relação ao material do revestimento.

Segundo Lima e Trevisan (2007), os revestimentos aspergidos possuem três aspectos básicos:

- **Substratos:** É onde os revestimentos são aplicados, incluem óxidos, madeiras, plásticos, vidros e metais. Necessita uma preparação antes da aspersão térmica, entre elas estão a limpeza da superfície e a manutenção de rugosidade superficial;
- **Camadas de ligação:** É a ligação entre o substrato e o revestimento, como citado anteriormente, essa ligação pode ser mecânica, física, química, metalúrgica ou uma combinação destas. A adesão depende de alguns fatores, entre eles estão: condição do substrato, material de revestimento, limpeza, grau de rugosidade da superfície, velocidade de impacto da partícula e a temperatura antes, durante e após a aspersão;
- **Estrutura do revestimento:** A estrutura depositada e a química do revestimento aspergido em ar ambiente são diferentes daquelas do mesmo material na forma manufaturada, ou antes de ser aspergido.

A Figura 8 ilustra, esquematicamente, a seção transversal de um revestimento aspergido.

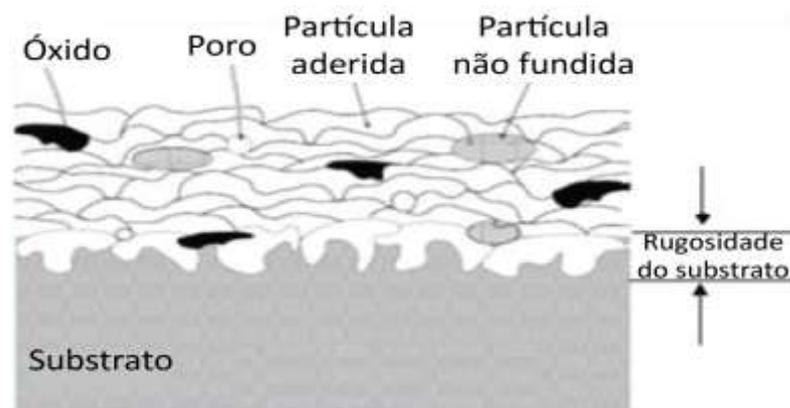


Figura 8 - Seção transversal de um revestimento aspergido. (Fonte: Infosolda)

A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos um que usa a chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. A Figura 9 ilustra essa classificação, com o processo HVOF em destaque.

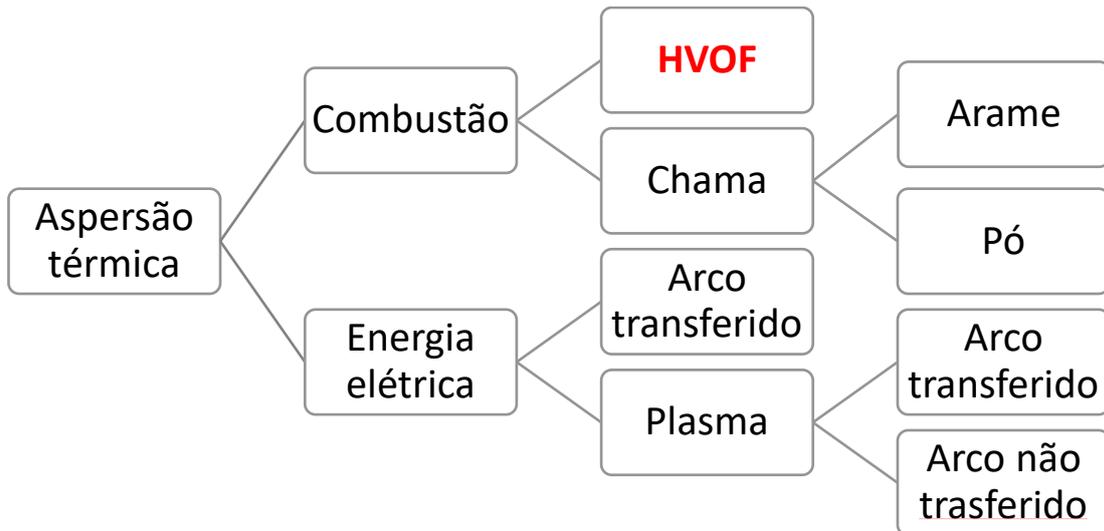


Figura 9 - Classificação dos processos de aspersão térmica. (Fonte: Própria autoria)

### 2.2.1 Aspersão térmica elétrica por plasma

A aspersão térmica por plasma é feita a partir do calor de um arco plasma para fundir os consumíveis do revestimento que estão dispostos na forma de pó. Existem dois modos de formação de plasma que são arco transferido e o não transferido (Figura 10). No primeiro caso, o arco atinge a peça, fechando assim o arco elétrico. No segundo caso, o arco é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o orifício constrito. Desta forma o plasma é forçado através do orifício pelo gás e a peça não faz parte do circuito elétrico. O calor útil é obtido somente do jato de plasma, sendo conhecido como processo de aspersão térmica plasma spray.

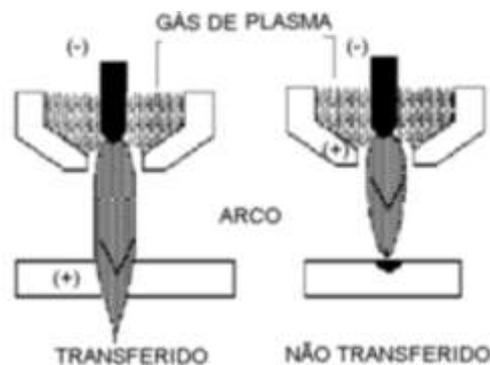


Figura 10 - Esquema da pistola nos diferentes tipos de aspersão por plasma. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes)

Segundo PAREDES (2012), o processo plasma de arco transferido, adiciona ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. Assim, pode-se dizer que é uma combinação de processos de soldagem e aspersão térmica. Nesta técnica, uma corrente secundária é estabelecida entre o eletrodo da pistola e o substrato que é condutor. A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material aspergido, geralmente na forma de pó, mistura-se com material da poça de fusão formada no substrato ocorrendo então uma diluição.

Já no processo aspersão térmica a plasma de arco não transferido a zona central do plasma é constituída pelo gás inerte ionizado, normalmente argônio, podendo ser nitrogênio, também com adições de hidrogênio e hélio. E estes gases passam através de um arco elétrico estabelecido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre dotado de um orifício, alinhados coaxialmente. Em sua passagem o gás é aquecido, gerando o plasma. Todo o processo é isolado por gases inertes de proteção (hélio, argônio, hidrogênio ou nitrogênio).

O pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado em direção ao substrato em um fluxo de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, intensidade da corrente elétrica, composição da mistura de gases e taxa de fluxo de gás de plasma.

### **2.2.2 Aspersão térmica elétrica por arco elétrico**

Aspersão térmica elétrica por arco elétrico é um processo de alta produtividade, com altas taxas de deposição, combinado com baixo custo dos consumíveis. O processo consiste na alimentação de 2 rolos de arame tubular ou sólido, os quais são energizados por uma fonte retificadora e enviados até a tocha por conduítes e na tocha os arames se encontram gerando entre si um arco elétrico, fundindo os arames simultaneamente, a uma temperatura que varia de 4.000°C até 6.000°C. Devido a essa alta temperatura, MARQUES (2003) afirma que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir áreas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. E estas interações são similares a pequenas soldas a ponto de conferir ao revestimento excelente resistência a adesão e coesão. A liga fundida é projetada na peça que é mantida a uma temperatura média de 200°C, evitando distorções e alterações metalúrgicas. A

combinação da alta temperatura e velocidade das partículas produzindo um revestimento de alta aderência, deposição e alta densidade.

Segundo LIMA E TREVISAN (2007), esse processo de aspersão térmica difere dos outros que não possuem fonte externa de calor, tais como chama de gás ou plasma induzido eletricamente. O aquecimento e a fusão ocorrem quando os arames carregados eletricamente com cargas opostas são alimentados conjuntamente e um arco elétrico controlado é gerado na sua intersecção, conforme ilustra a Figura 11.

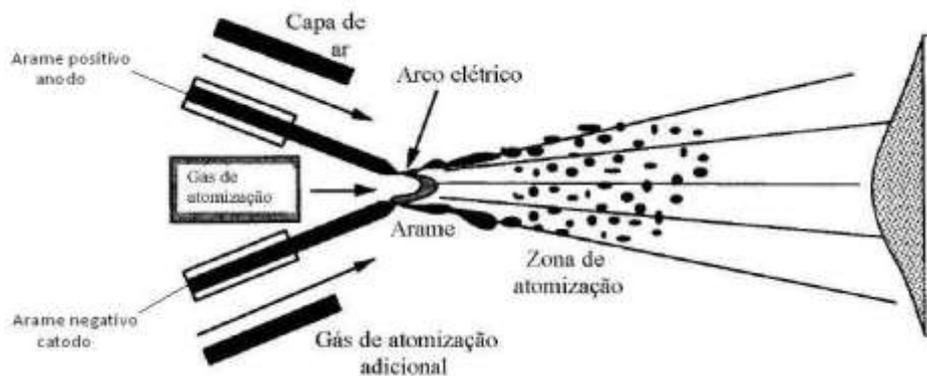


Figura 11 - Esquema do processo a arco elétrico. (Fonte: BERNDT e BERNECKI, 2004)

### 2.2.3 Revestimento por aspersão térmica a combustão por chama

O processo de aspersão por chama, também conhecido como processo a chama oxiacetilênica, utiliza a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com oxigênio para fundir o material de deposição que pode ser na forma de pó ou arame. Esses materiais podem ser metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos e até alguns plásticos.

No caso da aspersão térmica a chama convencional ser alimentada por um consumível em pó, o princípio de funcionamento pode ser observado conforme a Figura 12:

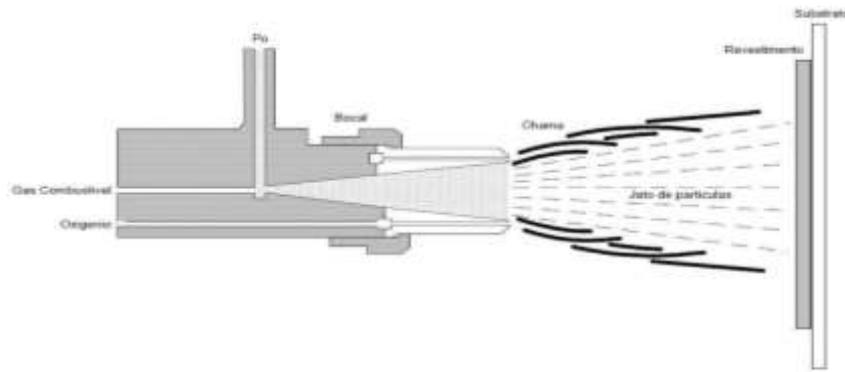


Figura 12 - Esquema de aspersão térmica a chama de pós. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes)

O pó de alimentação pode ser um metal puro, uma liga, um compósito, uma cerâmica, um carboneto ou qualquer combinação destes, com uma taxa de alimentação que pode variar de 50 a 100 g/min e com taxa de fluxo de gás de transporte entre 3 a 5 l/min. A relação da mistura oxigênio – combustível pode variar na faixa de 1:11 a 1,1:1, resultando em uma atmosfera carburante ou oxidante, respectivamente. A temperatura da chama varia de 2700 a 3100°C e a velocidade entre 80 a 3100 m/s.

Já na aplicação com o material consumível na forma de vareta ou arame o equipamento deve possuir um sistema de alimentação que pode ser através de roletes que são tracionados por motor elétrico, motor pneumático ou por uma turbina de ar. E o material é alimentado até a tocha que para utilização de arame tem a seguinte configuração conforme a Figura 13.

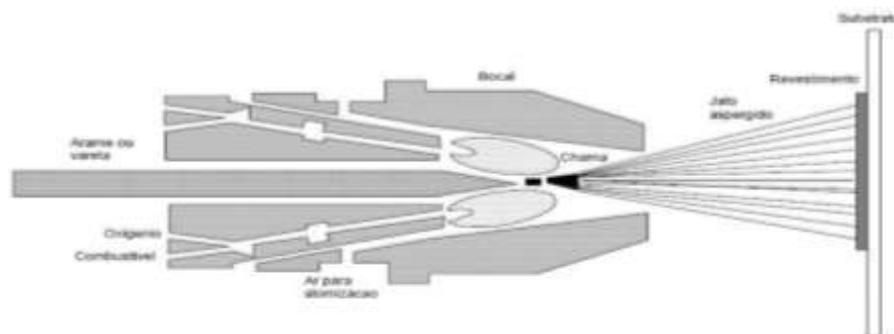


Figura 13 - Esquema de aspersão térmica por chama de arame. (Fonte: MARQUES - 2003)

Segundo PAREDES (2012), o arame alimentado, de forma contínua e concêntrica, é fundido no bocal por uma chama de gás combustível. E para aspergir o material é utilizado ar comprimido e devido à configuração do bocal, o fluxo de ar lançado sobre as partículas fundidas faz com que haja a pulverização com maior velocidade até o substrato.

## 2.2.4 Revestimento por aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF)

Por fim, o método de aspersão térmica utilizado para a realização do revestimento da rosca helicoidal tratada neste trabalho. Esse método, desenvolvido no final da década de 1970 e início de 1980, consiste na queima do gás combustível com oxigênio a alta pressão dentro de uma câmara de combustão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade conforme pode ser visto na Figura 14.

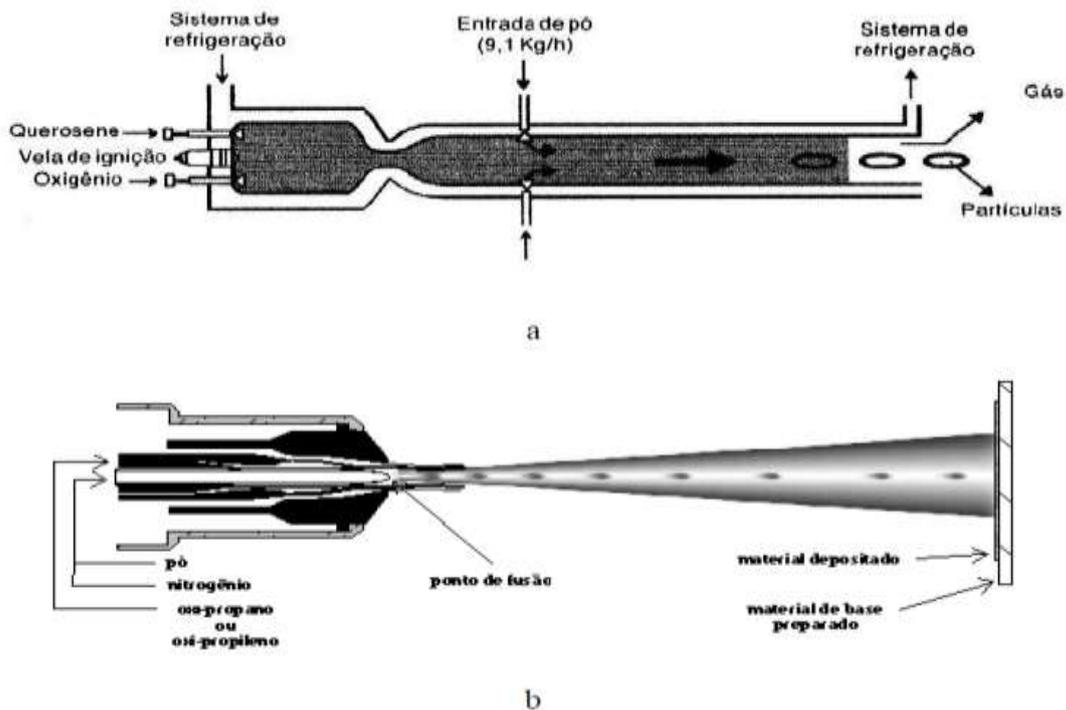


Figura 14 - a) Esquema de uma tocha de AT supersônico HVOF tipo convergente divergente. b) Esquema do tipo de pistola com câmara venturi. (Fonte: Ramón S. Cortés Paredes)

No modelo da Figura 14 (a), a alimentação do pó é realizada após a expansão dos gases em entram em combustão na câmara e saem com elevada energia cinética e térmica e transportam as partículas até o substrato a ser revestido.

No modelo da Figura 14 (b), alimentação do pó no bocal é realizada de forma concêntrica ao bico da pistola. Utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico. O pó é atomizado ao passar por uma câmara quente tipo Venturi que além de aquecido tem a velocidade aumentada. Mas o pó não funde devido ao curto intervalo de tempo que estas partículas ficam na fonte de calor, as quais são apenas aquecidas, o que permite a elas um significativo aumento de sua energia cinética. E assim no momento do impacto contra o substrato as partículas transferem elevada energia (cinética + impacto + elevado calor) conforme CORTÉS (1998).

O pó é normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas. De acordo com LIMA e TREVISAN (2007), as velocidades do gás têm sido medidas na faixa de 1500 a 2000 m/s. A temperatura da chama é relativamente baixa, em torno de 2900 °C, criando assim uma dificuldade para a aplicação da aspensão de cerâmicas em alguns metais refratários.

As altas velocidades de impacto das partículas sobre o substrato implicam que as partículas não necessitam estar completamente fundidas para se obter um revestimento de alta qualidade. Além disso, o fato de não haver superaquecimento pode minimizar problemas de tensões residuais, o que é especialmente importante com relação aos diâmetros internos e revestimentos espessos.

Outras características do processo de aspensão térmica HVOF segundo PAWLOWSKY (2008) e LIMA e TREVISAN (2007):

- Tamanho das partículas de pó variam de 5 a 45  $\mu\text{m}$ ;
- Taxa de alimentação de pó varia de 20 a 80g/min;
- Distância entre o bocal da pistola e a peça varia de 120 a 300mm;
- Taxa de fluxo de gás combustível varia de 40 a 60 l/min;
- Taxa de fluxo de oxigênio é maior, podendo chegar a até 430 l/min;
- Nível do ruído do processo HVOF é alto, atingindo uma escala de 140dB;
- Aderência da camada superior a 90 Mpa;
- Os alimentadores de pó geralmente são do tipo placa rotativa;
- Porosidade inferior a 1%;
- Espessura do material depositado na faixa de 0,1 a 0,3 mm.

Na Figura 15, é ilustrada a pistola de aplicação HVOF durante a aspensão de carvão de cromo.

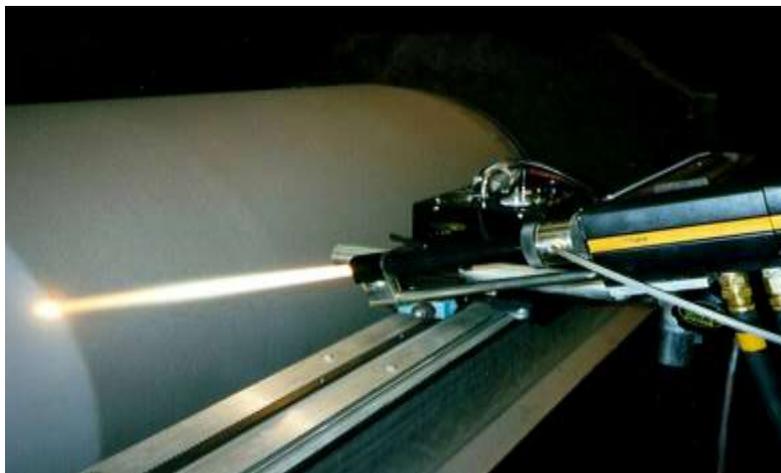


Figura 15 - Pistola de aspensão térmica HVOF em funcionamento. (Fonte: Plasma Coatings)

Para a aplicação correta do revestimento via HVOF, são necessários diversos equipamentos, como é ilustrado no esquema da Figura 16.

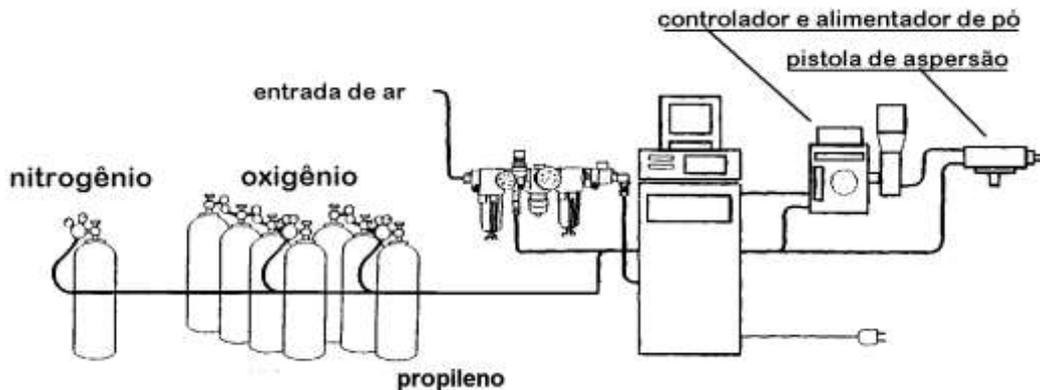


Figura 16 - Esquema de instalações para o funcionamento do processo HVOF. (Fonte: HOWARD)

Com o desenvolvimento do processo de aspersão térmica oxicom bustível de alta velocidade e a busca de melhores revestimentos foram implementadas algumas variações do processo:

- Tecnologia ultra-revestimento, desenvolvida pela empresa norte americana *Amoco*, utiliza hidrogênio como gás combustível, criando assim uma camada protetora de gás inerte para a chama obtendo menos porosidade entre as lamelas e menor conteúdo de óxidos;
- HVAF – High velocity air fuel, ou seja, ar combustível de alta velocidade, processo que utiliza ar em conjunto com o combustível líquido para sustentar a combustão, resultando assim em um processo com menor custo e de alta mobilidade, podendo ser transportado para revestimento em campo;
- HVIF – Hipersonic velocity impact forging, ou seja, forjamento por impacto hipersônico, processo em que a temperatura dos gases de combustão expandidos é mantida baixa para que não ocorra a fundição das partículas de pó. Dessa forma, resulta em um revestimento de baixa porosidade e mínima quantidade de óxidos devido a conversão da energia cinética em calor somente no impacto com a peça.

Na Tabela 1 é ilustrada a comparação entre as características todos os processos de aspersão térmica, com destaque para o método via HVOF.

Tabela 1 - Comparação das características dos processos de aspersão térmica (Fonte: THORPE)

Características						
Processos	Vazão de gases (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	30	3	Baixa
Chama (Arame)	71	2800	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	180	4	Média
Arco (Arame)	71	5500	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	240	6	Alta
Plasma	4.2	5500	N <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	240	6	Alta
Detonação	11	3900	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	910	8	Muito Alta
HVOF	28 - 57	3100	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	610 - 1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17 - 28	8300	N <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	240 - 1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8.4	8300	Ar, He	240 - 610	9	Muito Alta

### 2.2.5 Carbetos de cromo (CrC)

Os materiais carbetos empregados na aspersão térmica mais usuais são o carbeto de tungstênio e o carbeto de cobre, esses materiais se apresentam na forma de pós e possuem ótima resistência ao desgaste, assim como uma boa resistência a altas temperaturas de serviço.

O carbeto de cromo possui excelentes características para prevenir a ocorrência da oxidação e também possui uma boa aplicação para evitar a corrosão marinha. Em testes de névoa salina realizados de acordo com a norma ASTM B117, chega a suportar até 1000 horas.

Dessa forma, o carbeto de cromo se apresenta como um material eficiente e de ótima aplicação para resolver o problema do desgaste causado por grãos de cereais em roscas helicoidais agrícolas.

### 2.3 Laser de Nd-YAG e Laser de CO<sub>2</sub>

O uso do laser na indústria moderna vem crescendo rapidamente, pois o laser é uma ferramenta poderosa em muitas áreas, como a da soldagem e para a melhoria de

revestimentos depositados via aspersão térmica. As propriedades da coerência espacial e a alta radiança da luz laser são as bases de suas vantagens sobre métodos tradicionais de processamento de materiais. No presente trabalho, foi utilizado um laser de CO<sub>2</sub> e outro de Nd-YAG que permite a focalização da luz em um ponto muito pequeno, fornecendo uma densidade de radiação localizada e extremamente alta. Comparando o laser com tecnologias clássicas, o mesmo ainda vem sendo utilizado em lotes de peças pequeno, embora tem se observado um aumento na demanda por produtos de diferentes materiais, espessuras e geometrias.

Tanto o tratamento de revestimentos, quanto para o uso em soldagem de metais, os tipos de Lasers mais empregados são os gerados por uma mistura gasosa contendo gás carbônico e os geradores por Nd YAG no estado sólido. Ambos os lasers, CO<sub>2</sub> e Nd YAG podem ser usados em aplicações de corte, solda e modificações de superfície. O processo de interação do laser com os metais pode ser comparado ao problema de uma fonte de calor localizada na superfície de um metal. Quanto maior a potência dessa fonte, maior o aumento da temperatura na superfície, e, por consequência, maior é a profundidade de calor no material, aumentando assim, as suas propriedades mecânicas. O laser de Nd YAG é um laser de estado sólido, cujo elemento ativo é o íon de neodímio (Nd) e emite um feixe com comprimento de onda de 1,06 µm. O laser de CO<sub>2</sub> é um laser de 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. Consequentemente, o feixe e laser Nd YAG por ser menor é melhor absorvido pelos metais, do que o laser de CO<sub>2</sub> de comprimento de onda de 10,6 µm.

### **3. METODOLOGIA**

Para a realização da parte experimental do presente trabalho, buscando relacionar todos os experimentos realizados com a teoria, foram seguidos os fluxogramas das Figuras 17 e 18, a fim de obter uma melhor organização no desenvolvimento do trabalho.

## PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA ANÁLISE

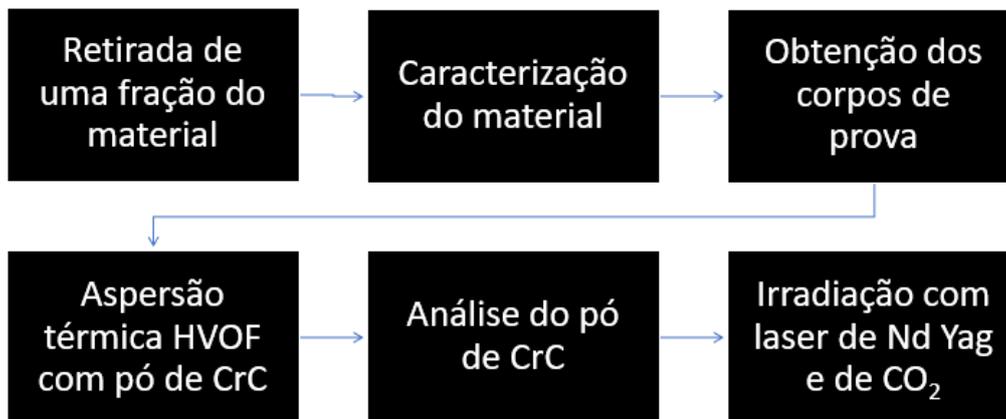


Figura 17 - Fluxograma de preparação das amostras (Fonte: Própria autoria)

## ORGANIZAÇÃO DA PARTE EXPERIMENTAL

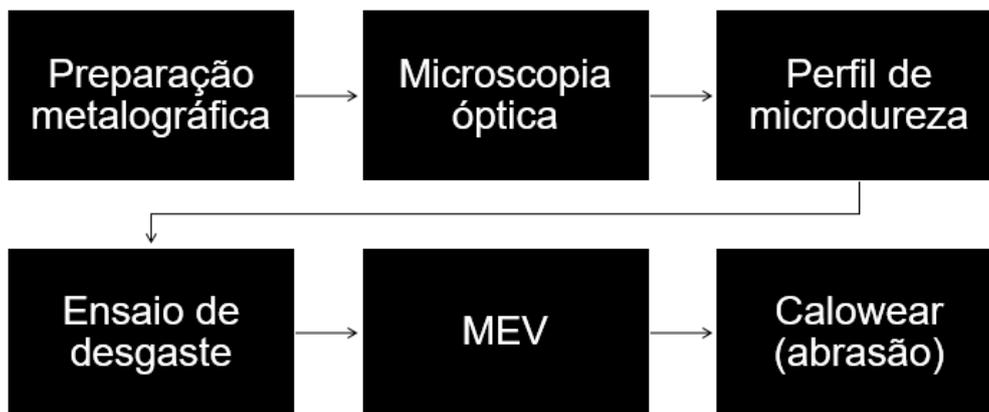


Figura 18 - Fluxograma da parte experimental. (Fonte: Própria autoria)

### 3.1 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, que estava em serviço em uma calha transportadora de arroz. O componente foi retirado durante a manutenção corretiva, dessa forma, tornou-se possível a realização do corte de uma fração do material para análise, conforme ilustra a Figura 19.

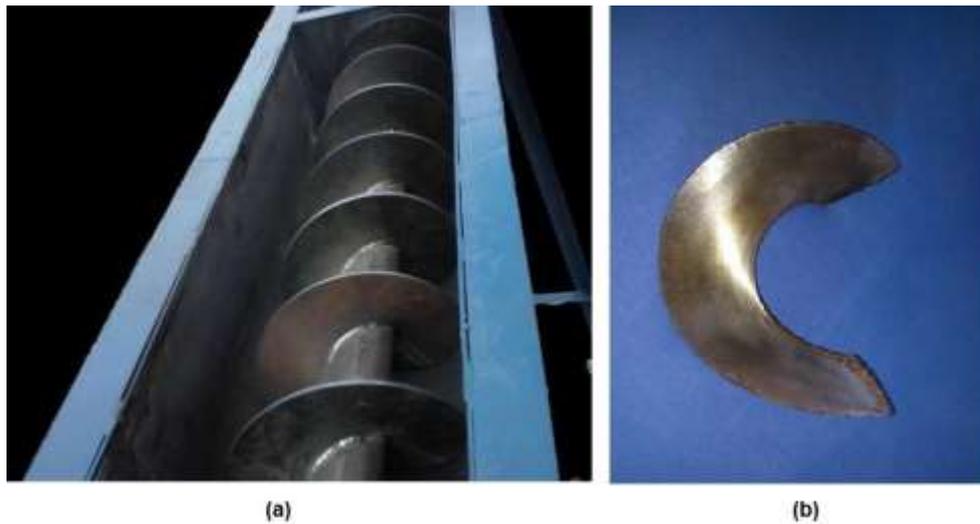


Figura 19 - (a) rosca helicoidal transportadora. (b) fração do material cortado para análise. (Fonte: Própria autoria)

A fração do material coletada foi enviada para a empresa Rijeza a fim de realizar a caracterização do material, que, após a análise, teve como resultado um aço AISI 1020.

Após a caracterização, foram geradas pela própria empresa 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, como ilustra a Figura 20.

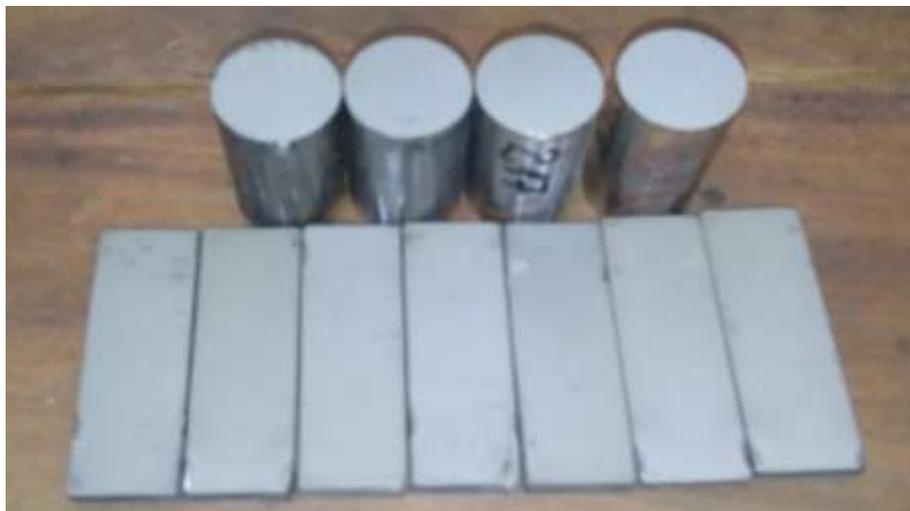


Figura 20 - Amostras enviadas pela metalúrgica Rijeza (Fonte: Própria autoria)

### 3.2 Análise do pó de CrC

Para realizar a análise microestrutural do pó de carbeto de cromo, analisando a sua pureza e morfologia, foi utilizado o MEV, que é capaz de fornecer imagens de alta resolução para um estudo mais detalhado do material. O aparelho utilizado é do modelo

EVO MA10 da marca Zeiss, empresa líder em tecnologia do setor óptico e optoeletrônico. Os testes foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa. A Figura 21 mostra uma imagem do pó de CrC utilizado na aspersão térmica do revestimento.

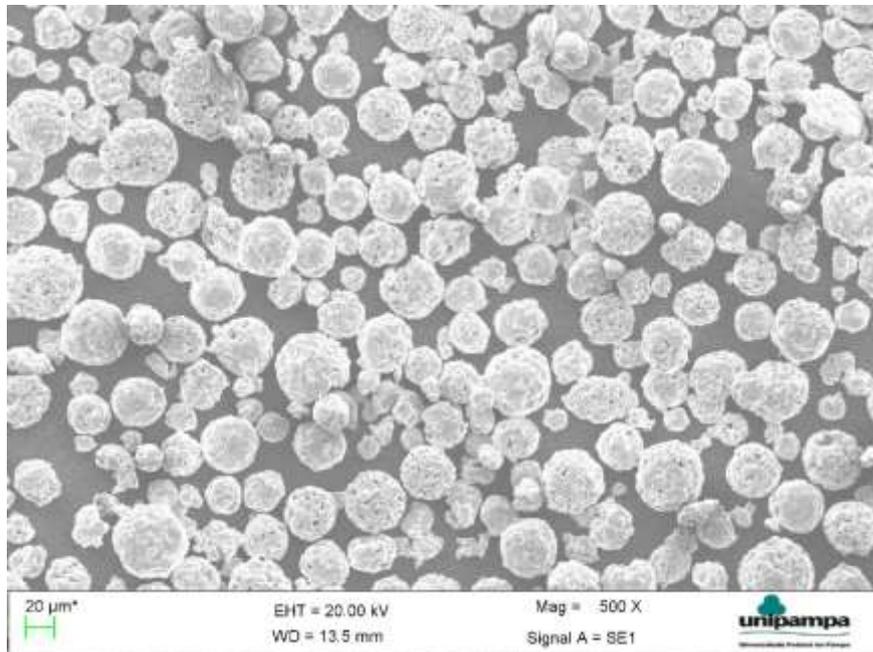


Figura 21 - Imagem da análise do pó de CrC com ampliação 500x. (Fonte: Própria autoria)

### 3.3 Aspersão térmica HVOF

Após a caracterização do material e confecção dos corpos de prova, os mesmos foram enviados para o laboratório da empresa Rijeza para preparação do substrato e aplicação do revestimento cerâmico 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, esse processo é ilustrado na Figura 22.

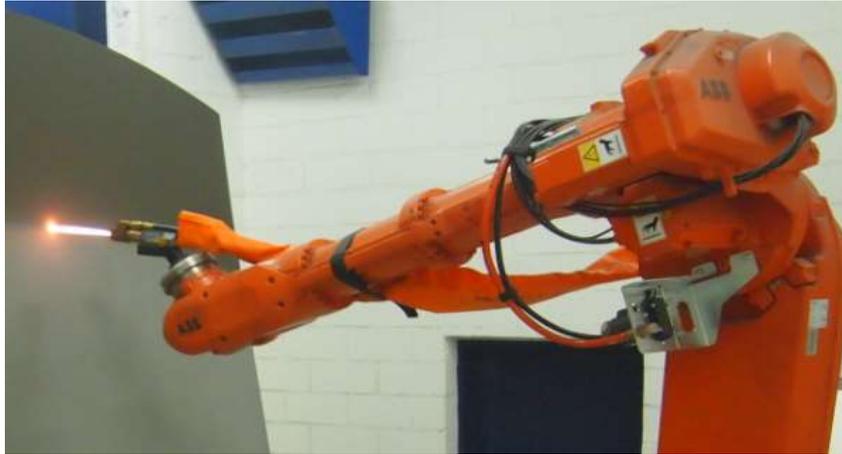


Figura 22 - Pistola aspersora HVOF acoplada a braço robótico (Fonte: Rijeza Metalurgia)

### 3.4 Irradiação com laser de Nd-YAg

Após o término do processo de aspersão térmica HVOF, os corpos de prova foram levados até o IEAv (Instituto de Estudos Avançados) na cidade de São José dos Campos – SP, para realização do tratamento com laser de Nd YAg. As amostras foram irradiadas por um feixe de laser concentrado, fundindo o substrato e o revestimento aspergido, densificando o material, um esquema desse tratamento é mostrado na Figura 23.

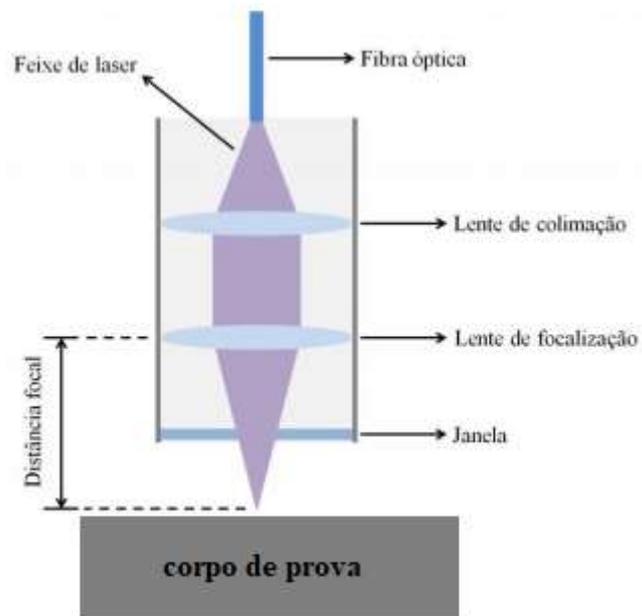


Figura 23 - Esquema de irradiação do feixe de laser Nd YAg (Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, R.)

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).

A técnica envolve a fusão de revestimento depositado sobre um substrato para assegurar uma ligação com a diluição mínima, de fusão nominal e uma zona de calor pequena afetada, essa fusão ocorre de acordo com a Figura 24.

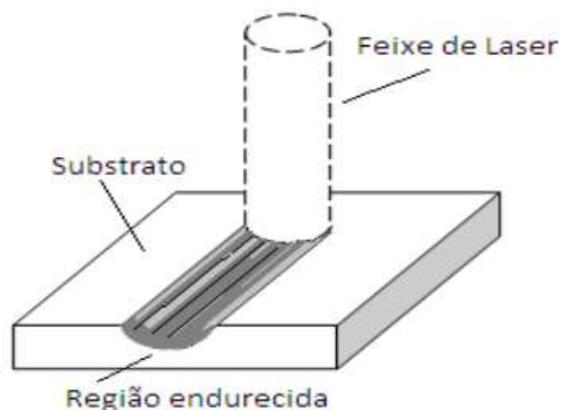


Figura 24 - Aplicação do feixe de laser. (Fonte: TELEGINSKI, V.)

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

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para aplicação do feixe de laser (Fonte: Própria autoria)

<b>Laser Nd YAg</b>	
Potência [W]	600
Velocidade do passe [mm/min]	600
Número de passes	6
Gás utilizado	Argônio
Vazão do gás [l/min]	26

### 3.5 Irradiação com laser de CO<sub>2</sub>

Após realizada a irradiação com laser de Nd YAg, 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 CO<sub>2</sub> da marca SYNRAD, modelo Evolution 125, conforme mostrado na Figura 25.



Figura 25 - Laser de CO<sub>2</sub> utilizado para o revestimento. (Fonte: Própria autoria)

A sobreposição do feixe de laser é um parâmetro muito importante no processo de irradiação com laser de CO<sub>2</sub>, a Figura 26 ilustra três valores distintos: sem sobreposição, com 50% de sobreposição e com 75% de sobreposição. Com altos valores de sobreposição (75%), a distribuição de intensidade na irradiação com feixe de laser de distribuição gaussiana pode levar a um efeito de distribuição contínua. No laser utilizado, foi acoplado um sistema de escaneamento como o “scan head”, a sobreposição é controlada por um parâmetro do software winmark denominado PPP que significa Pulsos Por Polegada.

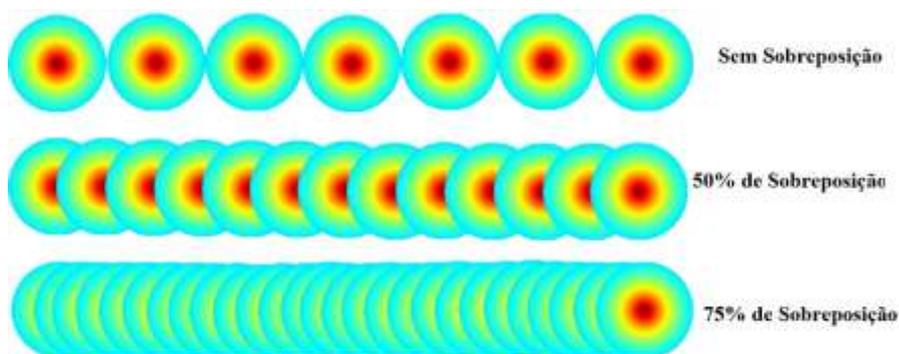


Figura 26 - Fator de sobreposição (SANTOS, C.)

O sentido de varredura do feixe de laser, conforme ilustrado na Figura 27, influencia 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.

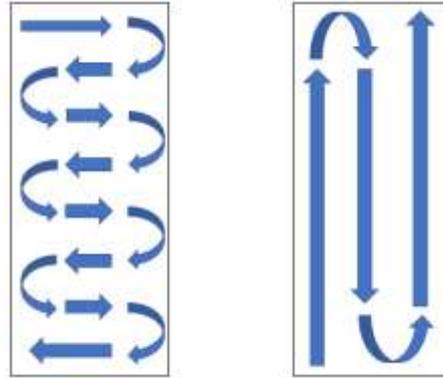


Figura 27 - Sentido de varredura do feixe de laser (Fonte: Própria autoria)

A partir dos estudos realizados, buscando o melhor parâmetro para aplicação do laser de Nd YAg, foram escolhidas as seguintes configurações mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no laser de CO<sub>2</sub> (Fonte: Própria autoria)

<b>Laser CO<sub>2</sub></b>	
Potência [%]	100
Velocidade do 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 28.



Figura 28 - Amostra após a irradiação a laser (Fonte: Própria autoria)

### 3.6 Análise metalográfica

Para realização do procedimento de análise metalográfica das amostras, realizado no laboratório de Química e Metalografia da Unipampa, foi seguido o fluxograma apresentado na Figura 29.

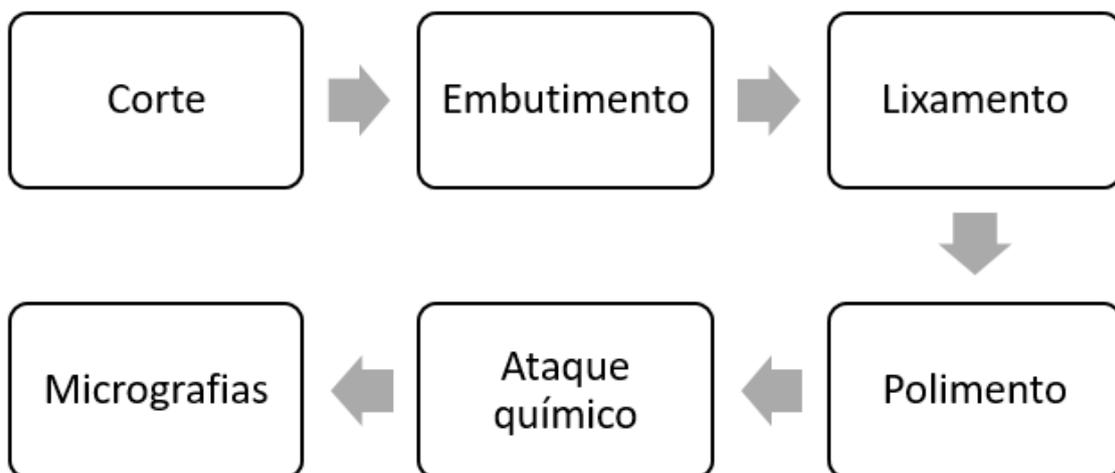


Figura 29 - Procedimento para realização da análise metalográfica (Fonte: Própria autoria)

#### 3.6.1 Corte

O corte das amostras utilizadas necessita um cuidado especial para que não ocorra a quebra e deslocamento do revestimento depositado sobre o material, dessa forma, para a realização do procedimento, foi utilizada uma cortadora de precisão modelo IsoMet

4000 da marca Buehler, conforme mostrada na Figura 30, que foi projetada para cortar diversos tipos de materiais com deformação mínima.



Figura 30 - Cortadora de precisão (Fonte: Própria autoria)

Para a realização do corte, foi utilizado um fluido refrigerante para reduzir o atrito entre a ferramenta e a superfície da amostra, e diminuir a temperatura na região de corte, onde foram definidos os seguintes parâmetros:

- Velocidade da lâmina de corte: 3050 RPM
- Taxa de alimentação: 2 mm/min

### 3.6.2 Embutimento

Para a realização desse procedimento, foi feito embutimento a quente em uma embutidora digital da marca Fortel, modelo EFD30, com aquecimento e resfriamento automático, porém, com controle de pressão manual. Esse equipamento utiliza uma pressão de trabalho de 1000 lbf/pol<sup>2</sup>, conforme ilustrado na Figura 31.



Figura 31 - Embutidora digital (Fonte: Própria autoria)

### 3.6.3 Lixamento, polimento e ataque químico

Após o embutimento, a amostra foi lixada com as lixas de granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 grãos/pol<sup>2</sup> respectivamente, rotacionando em 90° a amostra entre cada troca de lixa, até obter uma superfície espelhada. Para a realização desse procedimento, foi utilizada uma lixadeira manual de 4 pistas marca Fortel, modelo LMF, com sistema de aspersão de água corrente com distribuidor sobre as pistas e saída para recolhimento de água, conforme mostra a Figura 32.



Figura 32 - Lixadeira manual (Fonte: Própria autoria)

Após o uso da última lixa, a amostra foi polida com o auxílio de um pano de polimento (Figura 33), sendo adicionada uma leve camada de abrasivo, que neste caso, foi empregado o Óxido de Alumínio (Alumina).



Figura 33 - Pano de polimento (Fonte: Própria autoria)

Com a superfície polida, foi possível realizar o ataque químico, utilizando o reagente Kalling, para uma melhor visualização dos contornos de grão do material, visto que, para análise do revestimento não é necessário o ataque químico.

### 3.6.4 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, conforme mostra a Figura 34. Com auxílio de uma câmera fotográfica acoplada ao equipamento, foram captadas imagens que ilustram o substrato e o revestimento aspergido.



Figura 34 - Microscópio optico (Fonte: Própria autoria)

### 3.7 Perfil de microdureza

Para obtenção dos valores da microdureza do material, foi empregado um microdurômetro marca Buehler, modelo MicroMet 6010, instalado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da Unipampa, conforme ilustrado na Figura 35. Para obter o valor da dureza, o microdurômetro aplica a carga adequada, inserindo o indentedor piramidal na amostra e auxiliado por um software pré-determinado, mede ambas as diagonais da indentação que são usadas para determinar o valor em Vickers (HV).



Figura 35 - Microdurômetro (Fonte: Própria autoria)

Para medição do perfil de microdureza, foi aplicada uma carga de 500g, durante um tempo de 10 segundos. As indentações feitas na amostra foram realizadas da superfície aspergida até o substrato sem qualquer tratamento, distanciadas entre si numa ordem de 50 $\mu$ m, de forma que fossem distribuídas 4 indentações no revestimento, duas indentações no aço 1020 e uma indentação na zona de ligação entre as duas, conforme ilustrado na Figura 36. Dessa forma, é possível observar a grande diferença de dureza entre o núcleo de aço doce e o revestimento.

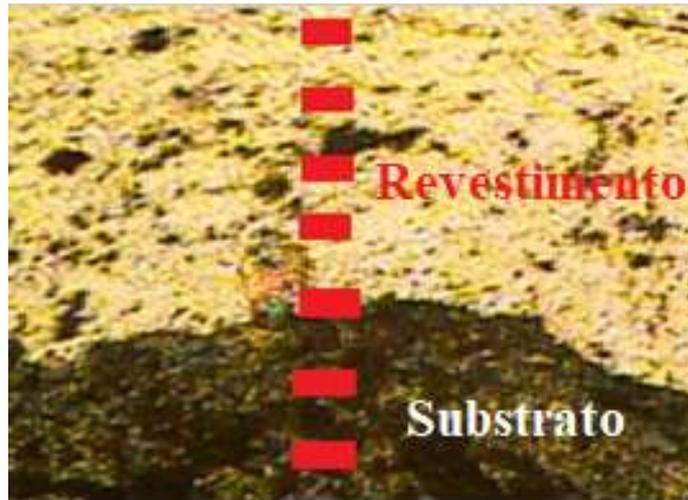


Figura 36 - Local das endentações para medição do perfil de microdureza (Fonte: Própria autoria)

### 3.8 Ensaio de desgaste

Com o objetivo de mensurar a melhoria da resistência ao desgaste do revestimento, foram feitas medições para o aço 1020, para o aço 1020 com revestimento HVOF e por último, para o aço 1020 com revestimento HVOF e laser de Nd YAg. Para realização do ensaio de desgaste foi utilizado o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Engenharia Mecânica da Unipampa. A Figura 37 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.



Figura 37 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de desgaste (Fonte: Própria autoria)

Na Figura 38, ilustrada abaixo é possível ter uma noção mais detalhada do funcionamento do equipamento utilizado para medir o desgaste, de acordo com a numeração apresentada.



Figura 38 - Detalhes do equipamento de ensaio de desgaste. (Fonte: Própria autoria)

Onde:

- 1) Porta amostra;
- 2) Disco de desgaste onde vai fixada a lixa em todo o seu perímetro;
- 3) Carga aplicada transformada em força pela máquina.

Após um estudo prévio e análise de ensaios realizados anteriormente, os parâmetros utilizados para realização do ensaio são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para realização do ensaio de desgaste (Fonte: Própria autoria)

#### Ensaio de desgaste

Diâmetro do disco de desgaste [mm]	60
Carga aplicada [Kg]	5
Número de ciclos	350
Granulometria da lixa [grãos/pol <sup>2</sup> ]	120
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 abaixo.

$$Pm = m_i - m_f \quad (1)$$

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, localizada no laboratório de química da Unipampa. Para obtenção de resultados mais preciso a amostra foi colocada dentro da balança e a mesma foi fechada para que não ocorresse a interferência do ambiente externo, conforme mostrado na Figura 39.



Figura 39 - Balança Shimadzu utilizada para medição da massa. (Fonte: Própria autoria)

### **3.9 Microscopia eletrônica de varredura**

A fim 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 que reproduz a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz de outros tipos de microscópio, produzindo imagens de alta resolução. Para captar essas imagens foi utilizado novamente o MEV mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Microscópio eletrônico de varredura (Fonte: Própria autoria)

### 3.10 Ensaio de abrasão (Calowear)

Para realização do ensaio de abrasão, foi utilizado um Calowear, marca CSM Instrumentas, modelo Calotest, conforme mostrado na Figura 41, instalado no laboratório de metalografia do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).



Figura 41 - Calowear (Fonte: Própria autoria)

Esse ensaio consiste em colocar em contato com o corpo de prova uma esfera girando a uma rotação pré-determinada, sob gotejamento de uma dispersão aquosa de um abrasivo, onde nesse caso prático, foi utilizado alumina sobre a superfície do corpo de prova, como pode ser visto esquematicamente na Figura 42.

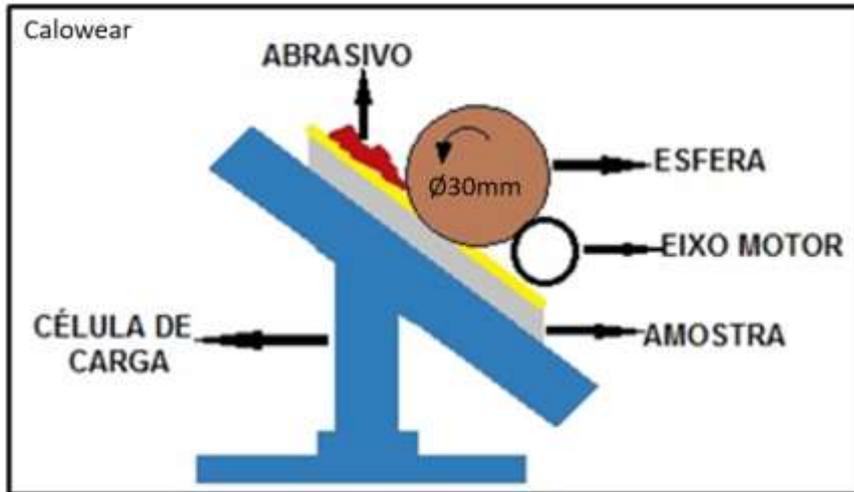


Figura 42 - Esquema Calowear (Fonte: TELEGINSKI, V.)

Após a realização do ensaio, há a geração de uma calota na superfície da amostra, que permite calcular a abrasão e a espessura da camada ( $e$ ), de acordo com a equação abaixo.

$$e = \frac{x.y}{\phi_{esfera}} \quad (2)$$

Onde o diâmetro da esfera é igual a 30 milímetros (figura 42) e  $x$  e  $y$  são mostrados na Figura 43.

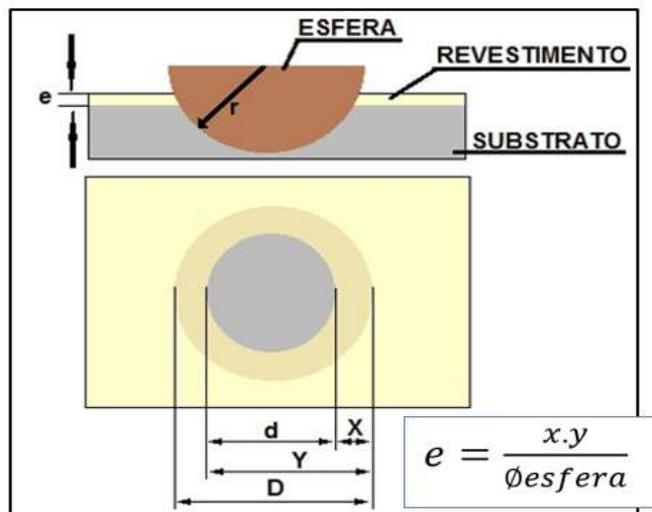


Figura 43 - Calota gerada pelo Calowear (Fonte: TELEGINSKI, V.)

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise óptica, microscopia eletrônica de varredura, calowear para determinação da espessura da camada aspergida, perfil de microdureza e desgaste, comparando as amostras conforme descrito na metodologia do Capítulo 3.

### 4.1 Calowear

Após a realização do ensaio de abrasão (calowear), conforme descrito na metodologia do Capítulo 3, o corpo de prova ensaiado foi colocado no microscópio eletrônico de varredura, onde pode ser analisado a calota criada pela esfera abrasiva, mostrada na Figura 44.



Figura 44 - Calota gerada no ensaio de abrasão. (Fonte: Própria autoria)

Com base na calota gerada e a imagem de alta resolução extraída do MEV, foi possível retirar os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Medidas da calota após ensaio de abrasão (Fonte: Própria autoria)

Medidas da calota	
Diâmetro externo	5,55mm
Diâmetro interno	2,81mm
X	1,39mm
Y	4,17mm

Através dos dados experimentais mostrados na tabela 3, aplicou-se a equação (2), onde foi determinado a espessura da camada do revestimento aspergido via HVOF.

$$e = \frac{x.y}{\phi_{esfera}} = \frac{1,39 \times 4,17}{30} = 0,19321 \cong 200\mu\text{m}$$

## 4.2 Microscopia Óptica

Após a preparação metalográfica das amostras, de acordo com o passo a passo indicado no Capítulo 3, foram retiradas imagens do microscópio óptico, onde podemos novamente medir a espessura da camada revestida, conforma é mostrado na Figura 45.



Figura 45 - Microscopia óptica. (Fonte: Própria autoria)

Como a espessura da camada pode ter uma pequena variação dependendo do ponto analisado, devido a sua escala ser em micrometros ( $10^{-6}$  m), devemos fazer uma média dos valores encontrados na figura 45, conforme mostrado na equação abaixo.

$$\frac{205,87 + 194,38 + 197}{3} = 199,08 \cong 200 \mu\text{m}$$

Dessa forma, comparando o resultado do Calowear com a da microscopia óptica, podemos observar que ambas as análises resultaram no mesmo valor para a espessura do revestimento aspergido sobre o corpo de prova, admitindo assim uma precisão satisfatória no resultado encontrado.

### 4.3 Análise do pó de CrC

Após realizada a análise microestrutural do pó de carvão de cromo, para obter o tamanho dos elementos e a sua pureza, foram geradas imagens pelo microscópio eletrônico de varredura, onde a Figura 46 mostra a imagem do pó de CrC, disponibilizado pela empresa Rijeza, ampliada com magnitude de 500X para realizar a medição do diâmetro de um elemento constituinte do pó utilizado no revestimento. Obteve-se um diâmetro de 39,36  $\mu\text{m}$  para um dos elementos.

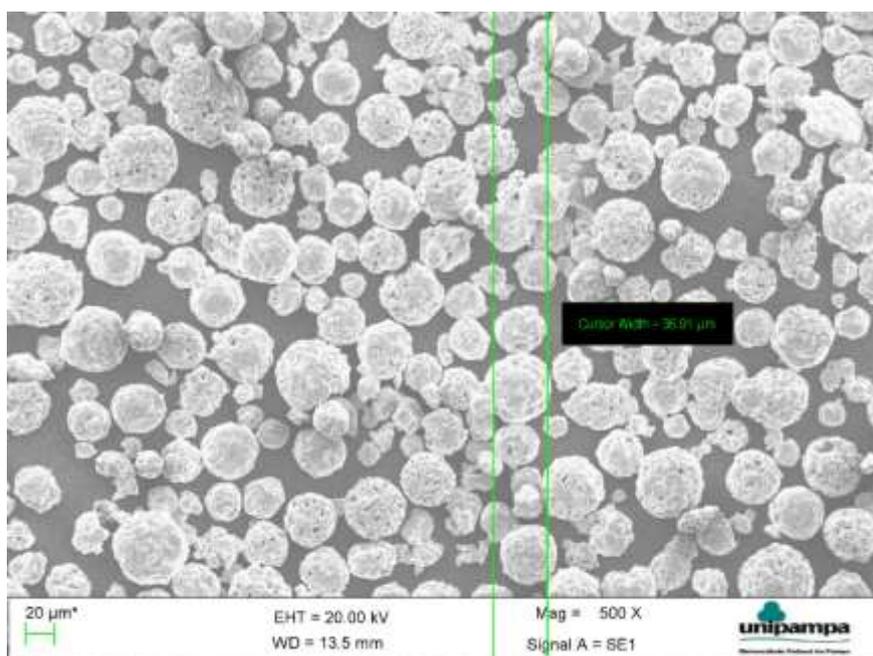


Figura 46 - Análise do pó de CrC indicando o diâmetro do elemento com ampliação 500x. (Fonte: Própria autoria)

Para melhor visualização da partícula do pó, a Figura 47 apresenta uma ampliação de 1000X em algumas partículas.

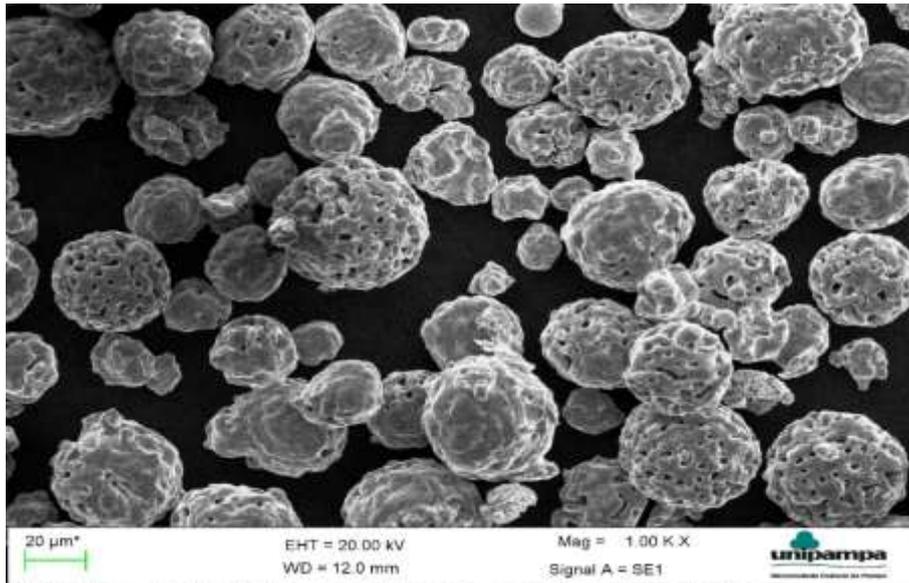


Figura 47 - MEV do pó de CrC com ampliação 1000x (Fonte: Própria autoria)

#### 4.4 Análise da interface do revestimento

Nesta seção, são mostradas as análises do revestimento com diferentes ampliações para avaliar a interface de ligação entre o revestimento e o substrato. Nas imagens apresentadas abaixo, o revestimento é mostrado na parte superior da linha vermelha que divide as imagens e o substrato é visto abaixo dessa mesma linha. A Figura 48 mostra as imagens captadas pelo MEV com ampliação de 200x.

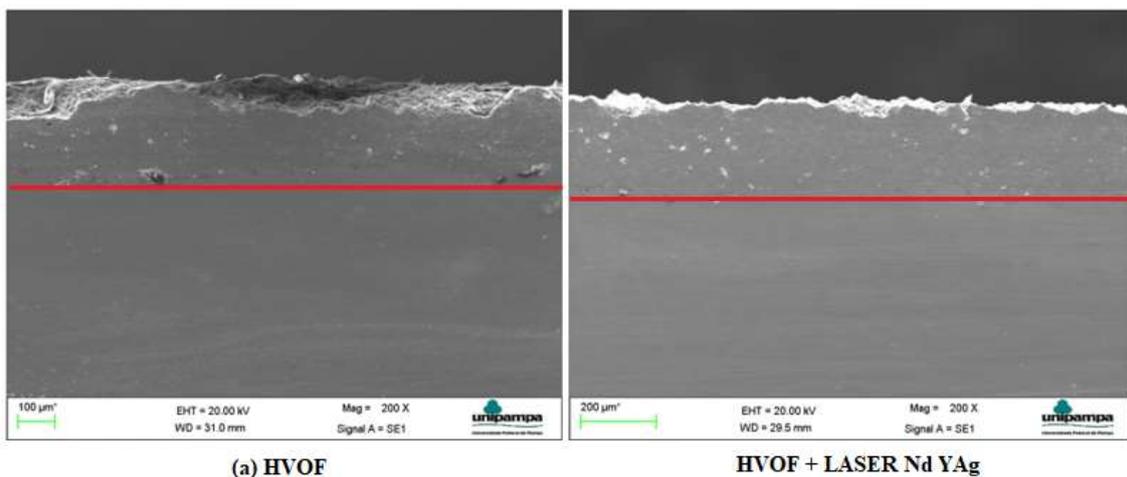


Figura 48 - MEV com ampliação 200x (Fonte: Própria autoria)

Analisando a figura acima, podemos observar que o revestimento aspergido via HVOF sem a aplicação de laser (Figura 48 (a)) se mantém bastante homogêneo, sem trincas e com porosidade muito baixa. Porém, quando comparada a imagem da figura 48 (b), onde foi aplicado o laser de Nd YAg, 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. É possível observar a ligação metalúrgica entre o revestimento e o metal base, resultando assim, em um revestimento com ótima resistência ao deslocamento e uma melhora das propriedades mecânicas, visto que os poros existentes foram preenchidos quando aplicado o feixe do laser. A Figura 49 apresenta a mesma comparação entre os materiais, porém com uma ampliação de 500x.

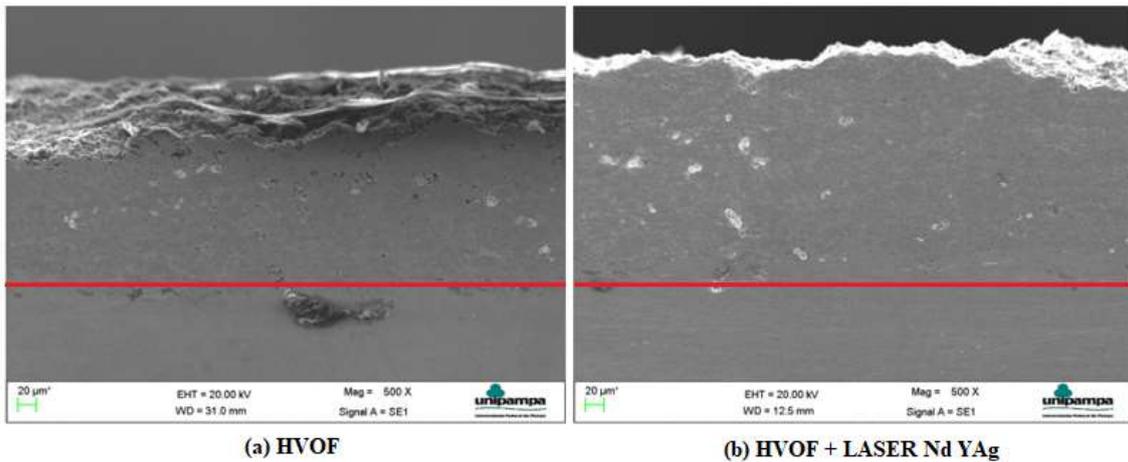


Figura 49 - MEV com ampliação de 500x. (Fonte: Própria autoria)

Na figura 49 (b) novamente podemos observar uma grande melhora no acabamento superficial do revestimento irradiado com laser de Nd YAg, apresentando assim, uma menor rugosidade e também a diminuição dos poros, aumentando as suas propriedades mecânicas quando comparado a Figura 49 (a), sem a aplicação do laser. A Figura 50 mostra as amostras com ampliação de 800x.

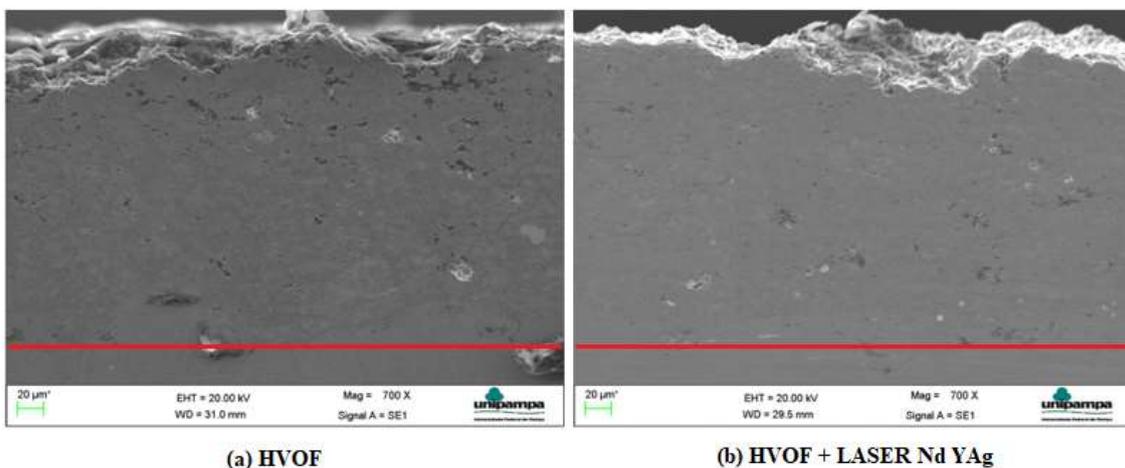


Figura 50 - MEV com ampliação de 700x. (Fonte: Própria autoria)

Com o aumento de 800x é possível ter uma melhor visualização do fechamento e diminuição dos poros do revestimento da Figura 50 (a), quando aplicado o feixe de laser Nd YAg mostrado na Figura 50 (b), resultando assim em uma camada mais homogênea e com propriedades mecânicas melhores.

A Figura 51 apresenta uma comparação entre a amostra com o revestimento de CrC aspergido via HVOF e irradiado com laser de CO<sub>2</sub> (Figura 51 (a)) e a outra amostra, irradiada com laser de Nd YAg (Figura 51 (b)).

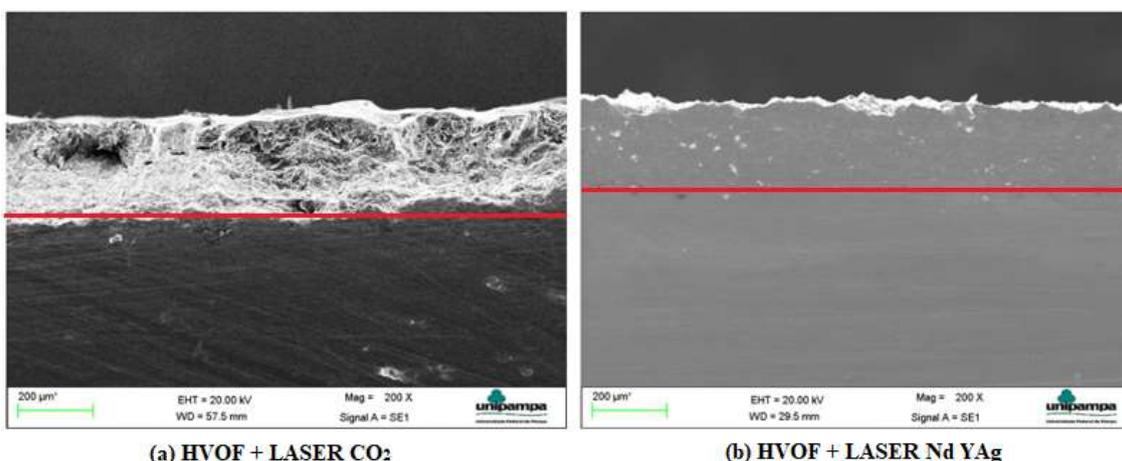


Figura 51 - Comparação entre laser de CO<sub>2</sub> e Nd YAg. (Fonte: Própria autoria)

Para efeito de comparação, a Figura 51 traz duas microscopias eletrônicas de varredura do mesmo corpo de prova, com a mesma ampliação, variando apenas o tipo de laser utilizado. Podemos observar que o CrC não apresentou bons resultados quando irradiado com laser de CO<sub>2</sub>, 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 Nd Yag, 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, apresentando um alto nível de absorção pelo corpo de prova e gerando uma densificação do revestimento e de parte do substrato.

#### 4.5 Perfil de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3, apresentando resultados na escala Vickers (HV) com uma carga de 0,5 kg. Para uma melhor análise dos resultados, foram realizadas cinco séries de endentações,

variando ao longo da amostra, começando pela superfície do revestimento, distanciando-as na direção do núcleo do substrato. Os valores médios de microdureza obtidos entre as 5 medições juntamente com o seu desvio padrão obtidos para o corpo de prova aspergido com irradiação a laser de Nd YAg são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF + Laser Nd YAg (Fonte: Própria autoria)

Posição	Média	Desvio padrão
0 $\mu\text{m}$	<b>1182,27</b>	42,02
50 $\mu\text{m}$	<b>1082,93</b>	31,05
100 $\mu\text{m}$	<b>871,53</b>	18,78
150 $\mu\text{m}$	<b>732,83</b>	5,26
175 $\mu\text{m}$	<b>566,43</b>	10,80
200 $\mu\text{m}$	<b>440,13</b>	29,83
225 $\mu\text{m}$	<b>374,60</b>	25,92
250 $\mu\text{m}$	<b>243,40</b>	18,04
300 $\mu\text{m}$	<b>192,53</b>	10,21

Os valores de microdureza destacados em amarelo na tabela, são os que estão na região de ligação entre o substrato e o revestimento, conforme é ilustrado no gráfico da Figura 52.

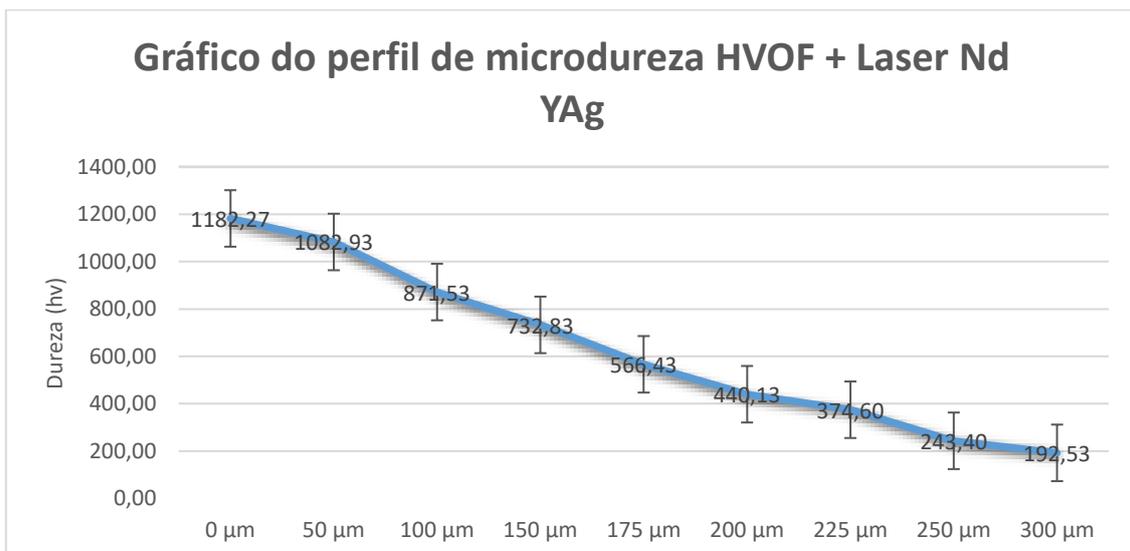


Figura 52 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF + laser Nd YAg. (Fonte: Própria autoria)

Analisando os dados experimentais e o gráfico gerado para as microdurezas do revestimento com irradiação a laser de Nd YAg, pode-se perceber que a amostra apresentou uma grande melhoria na dureza superficial, chegando a uma média de 1182,27 HV. De acordo com que o indentador foi se distanciando da superfície esse valor foi diminuído, porém as quatro endentações que ficaram acima da região de ligação apresentaram altos valores de dureza, todos superiores a 560 HV e as duas endentações realizadas no substrato apresentaram valores inferiores a 250 HV.

A Tabela 7 apresenta os dados obtidos para o corpo de prova aspergido com irradiação a laser de CO<sub>2</sub>

Tabela 7 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF + Laser CO<sub>2</sub> (Fonte: Própria autoria)

Posição	Média	Desvio padrão
0 µm	<b>1344,81</b>	54,12
50 µm	<b>1315,62</b>	43,75
100 µm	<b>944,50</b>	29,90
150 µm	<b>750,73</b>	22,24
175 µm	<b>752,14</b>	19,90
200 µm	<b>410,83</b>	17,03
225 µm	<b>197,92</b>	19,20
250 µm	<b>245,50</b>	12,87
300 µm	<b>170,21</b>	9,45

Os valores de microdureza destacados em amarelo na tabela, são os que estão na região de ligação entre o substrato e o revestimento, conforme é ilustrado no gráfico da Figura 53.

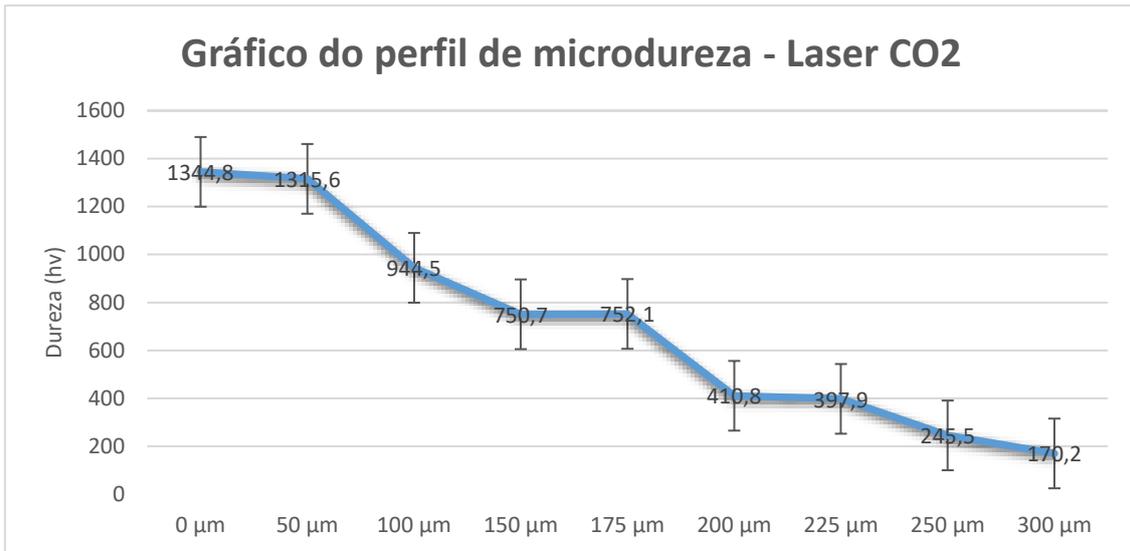


Figura 53 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF + laser CO2. (Fonte: Própria autoria)

Analisando os dados experimentais e o gráfico gerado para as microdurezas do revestimento com irradiação a laser de CO<sub>2</sub>, pode-se perceber que a amostra apresentou uma grande 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 Nd YAg. De acordo com que o endentador 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.

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos para o corpo de prova aspergido sem irradiação a laser.

Tabela 8 - Dados obtidos para o perfil de microdureza média com HVOF (Fonte: Própria autoria)

Posição	Microdureza	Desvio padrão
0 µm	<b>724,80</b>	10,32
50 µm	<b>695,70</b>	4,62
100 µm	<b>578,50</b>	8,69
150 µm	<b>452,00</b>	3,57
175 µm	<b>416,60</b>	3,11
200 µm	<b>359,03</b>	6,91
225 µm	<b>344,80</b>	5,41
250 µm	<b>224,73</b>	10,28
300 µm	<b>141,47</b>	4,18

Os valores de microdureza destacados em amarelo na tabela, são os que estão na região de ligação entre o substrato e o revestimento, conforme é ilustrado no gráfico da Figura 54.

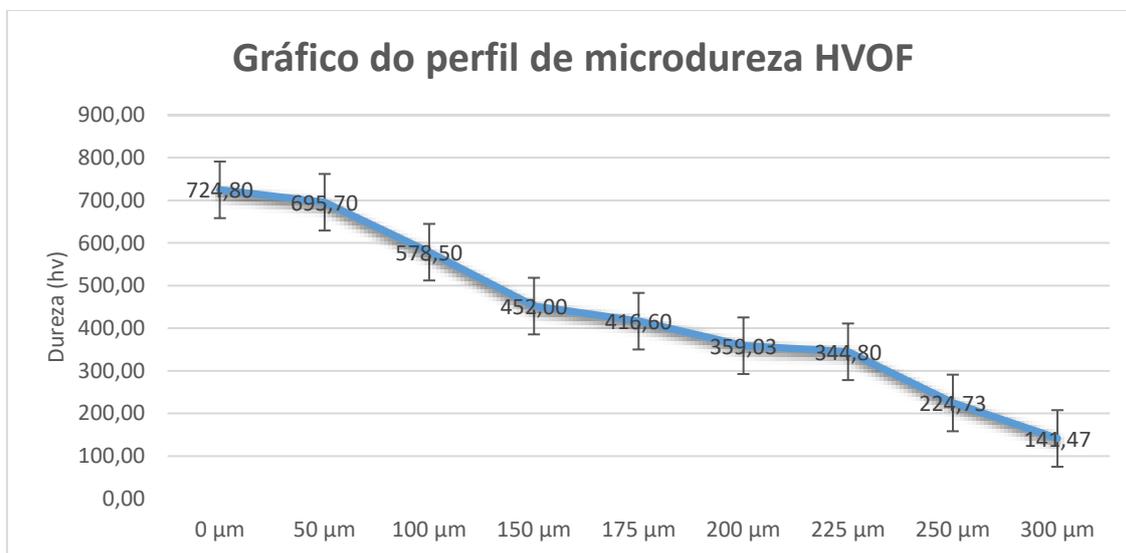


Figura 54 - Gráfico do perfil de microdureza HVOF. (Fonte: Própria autoria)

Analisando os resultados obtidos para o perfil de microdureza do revestimento aspergido sem irradiação a laser, também pode-se observar uma melhoria na dureza superficial da amostra, porém foram bem menores que os valores obtidos para o corpo de prova irradiado. Perto da superfície, a amostra apresentou uma microdureza de 724,8 HV que foi diminuindo em função do deslocamento do endentador em direção ao núcleo do substrato.

#### 4.6 Ensaio de Desgaste

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 Nd YAg. 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, conforme mostrado na Figura 51 (a). A Figura 55 apresenta um gráfico contendo os resultados obtidos após o ensaio utilizando os parâmetros citados no Capítulo 3.

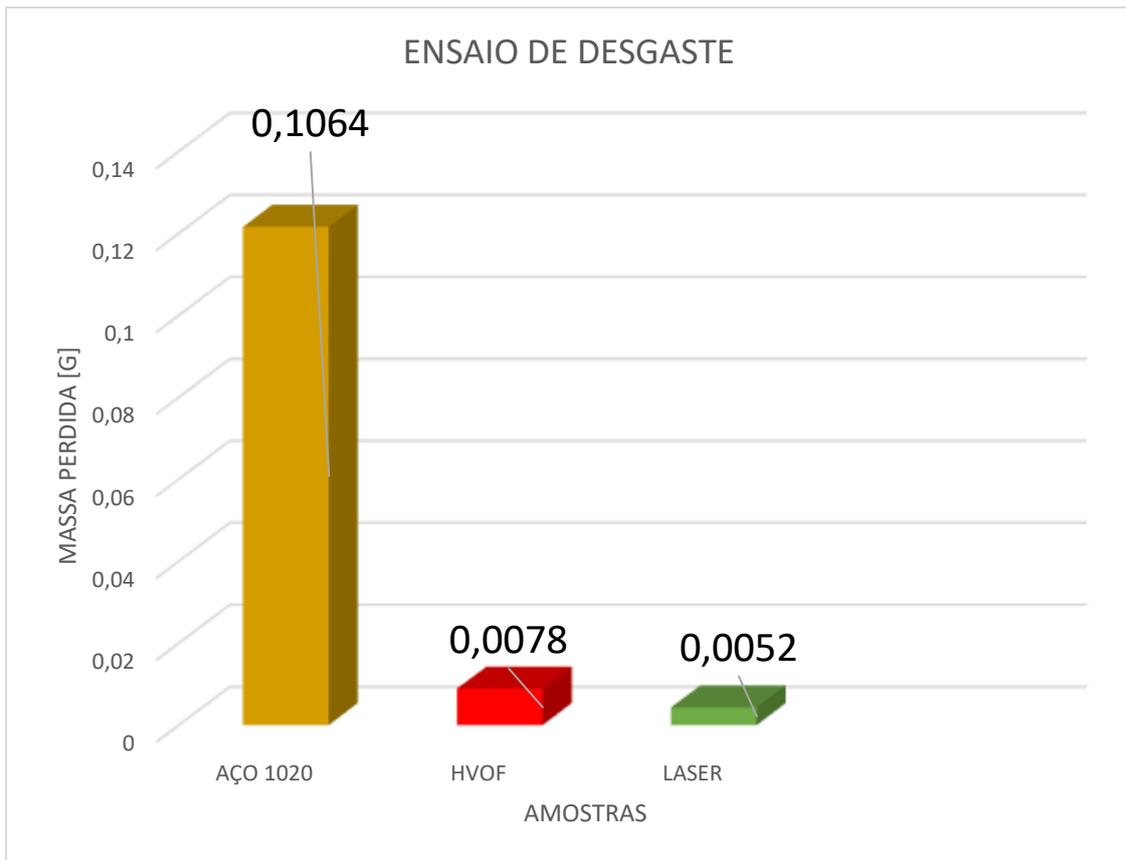


Figura 55 - Gráfico comparativo do ensaio de desgaste. (Fonte: Própria autoria)

Analisando o gráfico 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 Nd YAg foi a que apresentou a melhor resistência ao desgaste, perdendo apenas 0,0052 g durante o ensaio. De acordo com esses dados, pode-se concluir que:

- Um substrato de aço 1020 com revestimento de CrC apresenta uma melhora de 92,67% de resistência ao desgaste;
- Um substrato de aço 1020 com revestimento de CrC posteriormente irradiado com laser de Nd YAg apresenta uma melhora de 95,11% de resistência ao desgaste.

#### 4.7 Estudo da viabilidade econômica

Como abordado anteriormente, roscas helicoidais são elementos mecânicos de grande porte e que apresentam áreas muito grandes que necessitam a aplicação de revestimento de CrC. Dessa forma, foi necessário realizar uma pesquisa de mercado para descobrir o valor de aplicação desse revestimento, onde chegou-se ao valor de R\$ 12.000,00 por metro quadrado.

Adotando uma rosca helicoidal transportadora completa, comumente utilizada para transporte de arroz em silos ou secadores de grãos, com diâmetro aproximado de 300mm e comprimento de 5 metros, que tem um valor de mercado aproximado de R\$6.000,00 se fosse aplicar um revestimento em toda a área de seu helicoide, somente a aspersão térmica resultaria no valor de R\$ 29.056,8, visto que a rosca apresenta uma área de 2,4214 m<sup>2</sup>.

Uma alternativa a esse alto valor, é aplicação do revestimento de CrC somente nas bordas do helicoide, pois é a região onde apresenta o maior desgaste e o início das trincas consequentes do grande atrito com a sílica da casca do arroz. Dessa forma o helicoide ficaria com a aparência ilustrada na Figura 56.

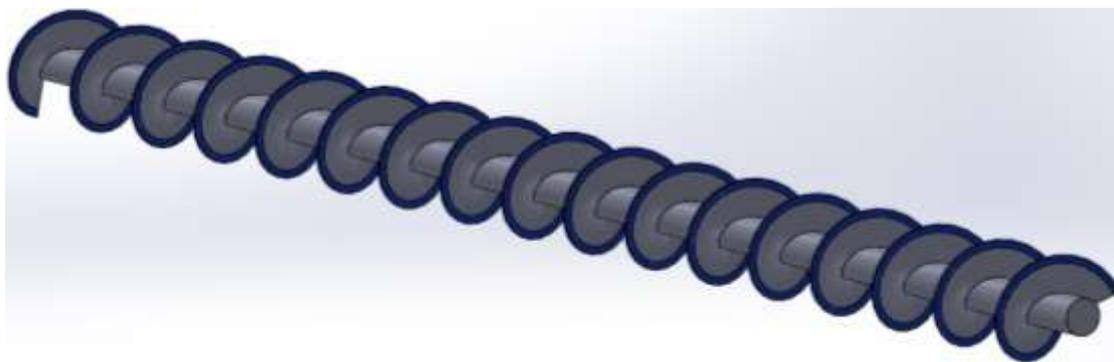


Figura 56 - Helicoide com revestimento a base de CrC nas bordas. (Fonte: Própria autoria)

Com o auxílio do software de CAD Solidworks, foi possível esboçar uma peça com revestimento de espessura 20mm nas extremidades do helicoide. Aplicando o revestimento somente nessa área destacada em azul na figura anterior, o custo de aplicação diminuiria consideravelmente, visto que a nova área seria de apenas 0,6254 m<sup>2</sup>, resultando assim, em um custo de aplicação de R\$7.504,80.

Dessa forma, uma rosca helicoidal que antes possuía valor aproximado de R\$ 6.000,00, passaria a ser comercializada pelo preço de aproximadamente R\$ 13.500,00,

com revestimento de CrC nas extremidades. Para ser viável a compra desses helicoides, o ganho em vida útil e resistência ao desgaste deve pelo menos dobrar em relação aos produtos já comercializados.

## 5. CONCLUSÕES

Após a apresentação dos resultados obtidos neste trabalho, podemos retirar algumas conclusões sobre o estudo tribológico da aplicação do revestimento de carbeto de cromo aspergido via HVOF em um substrato de aço 1020 e desse mesmo material irradiado com laser de ND YAg. Portanto, o estudo em questão nos permitiu visualizar os seguintes tópicos:

- I. Com a análise da espessura da camada revestida de CrC foi possível observar, realizando o ensaio de abrasão (Calowear) e imagens de microscopia óptica, que essa camada protetora manteve uma espessura regular de 200  $\mu\text{m}$  e homogênea durante todo o comprimento da superfície da amostra, além disso, 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, quando comparada a aplicação manual.
- II. Analisando o pó de CrC com auxílio do microscópio eletrônico de varredura, pode-se observar um diâmetro médio inferior a 40  $\mu\text{m}$  dos elementos constituintes, apresentando assim 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 Nd YAg sobre a camada aspergida de CrC, o mesmo obteve 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 na Seção 4, 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<sub>2</sub> não apresentaram os resultados esperados, pois a interação do feixe de laser com o revestimento de CrC não homogeneizou o material, mas o deixou mais duro e quebradiço, dessa forma

ocorreu o descolamento da 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 assim, 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 nos mostrou os resultados mais satisfatórios, visto que a aplicação desse revestimento é em roscas helicoidais agrícolas para o transporte de arroz, onde 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 Nd YAg 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.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Variar os parâmetros do laser de Nd-YAg, visando obter melhorias na camada revestida;
- Criação de um modelo físico com uma rosca helicoidal em escala reduzida para realizar o ensaio de desgaste, colocando a peça solicitada em contato com o arroz, visando a obtenção de resultados mais precisos para a aplicação do revestimento de CrC na indústria agrícola.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Welding Society, **Thermal Spraying** – practice, theory and applications, Miami, FL, USA, 1985.
- [2] DUSA, K. M; **Spraytime Magazine: ITSA historical collection growing**. ASM International/TSS – Thermal Spray Society, ITSA. 2001, vol 8. Nº 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 hipersônica (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 Artliber. 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 Engineering of Thermal Spray Coatings** – 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, 2008.

- [12] UPADHYAYA, G. S. **Materials science of cemented carbides – An overview.** Materials and Design, 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. **Surface and Coatings 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 CO<sub>2</sub> para proteção térmica de palhetas de turbinas aeronáuticas e industriais.** Instituto tecnológico da Aeronáutica (ITA), 2016.
- [17] MARANHO, O. **Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente.** 2006. 188p. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.