

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

**APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE WC DEPOSITADO POR ASPERSÃO
TÉRMICA PELO MÉTODO HVOF PARA DIMINUIR A ABRASÃO DO GRÃO DE
ARROZ EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

**Alegrete
2016**

RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

**APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE WC DEPOSITADO POR ASPERSÃO
TÉRMICA PELO MÉTODO HVOF PARA DIMINUIR A ABRASÃO DO GRÃO DE
ARROZ EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

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
2016**

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).

P199a Panziera, Renato Camponogara

APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE WC DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA PELO MÉTODO HVOF PARA DIMINUIR A ABRASÃO DO GRÃO DE ARROZ EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS / Renato Camponogara Panziera.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2016.

"Orientação: Ana Cláudia Costa de Oliveira".

1. Aspersão térmica. 2. Laser. 3. Desgaste. I. Título.

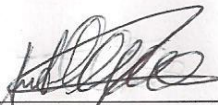
RENATO CAMPONOGARA PANZIERA

**APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE WC DEPOSITADO POR ASPERSÃO
TÉRMICA PELO MÉTODO HVOF PARA DIMINUIR A ABRASÃO DO GRÃO DE
ARROZ EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

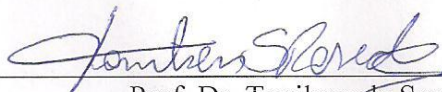
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13 de Dezembro de 2016.

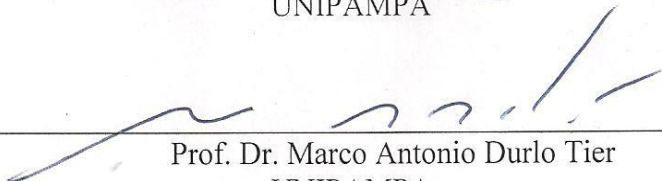
Banca examinadora:



Prof. Dra. Ana Cláudia Costa de Oliveira
Orientadora
UNIPAMPA



Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão que sempre estiveram ao meu lado dando todo suporte e apoio necessário e aos meus amigos, colegas e professores.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer em especial a minha orientadora a professora Ana Cláudia Costa de Oliveira que me orientou durante todo o processo de realização deste trabalho com muita sabedoria, dedicação e paciência nos momentos de dúvidas.

Aos meus pais Delcio e Nilva e ao meu irmão Dionizio que sempre me deram todo o apoio necessário.

A empresa Rijeza por fornecer as amostras aspergidas com WC utilizadas nesse trabalho.

A professora Silvelene Alessandra Silva por efetuar o tratamento a laser de CO₂ nas amostras para realização dos testes deste trabalho.

Aos bolsistas da professora Ana Cláudia Costa de Oliveira pela auxílio dado na realização das análises das amostras.

Aos professores Marco Antonio Durlo Tier e Tonilson de Souza Rosendo, que fizeram parte da banca de defesa, pelas sugestões de correções construtivas e elogios dados a este trabalho.

A Unipampa por proporcionar um curso de tão grande qualidade para formação de engenheiros mecânicos.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

Com a mecanização da agricultura, a necessidade passou a ser a melhoria contínua de máquinas e implementos agrícolas. Sendo assim, alguns problemas são incessantemente enfrentados, como o desgaste de componentes mecânicos causados pelo contato com os grãos por exemplo. Devido à necessidade de se obter uma superfície que aumente a vida útil de peças e componentes de máquinas e que possua propriedades mecânicas que sejam resistentes ao desgaste abrasivo, devido ao contato com o grão de arroz com casca, foi feita uma superfície revestida por aspersão térmica através do método de deposição HVOF (do inglês *high velocity oxygen fuel*) com pó de carboneto de tungstênio sobre os componentes devidamente preparados e pós-tratamento com laser de CO₂, visando obter uma melhor adesão do revestimento e o substrato (interface). Esse revestimento, devido a sua dureza ser bastante elevada, é altamente resistente aos desgastes por abrasão, adesão e erosão. Possui uma estrutura densa, com baixíssimo nível de porosidade e uma aderência ao substrato bastante elevada. As amostras revestidas foram caracterizadas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para avaliar a morfologia do revestimento, Espectrometria de emissão óptica para avaliar os elementos químicos presentes no substrato, análise de microdureza, teste de desgaste e teste de rugosidade. Os ensaios e análises mostraram que as amostras revestidas com WC apresentaram melhor desempenho nos testes de microdureza, desgaste e rugosidade em relação as amostras irradiadas com o feixe de laser.

Palavras-Chave: Aspersão térmica, HVOF, laser, revestimentos, desgaste por abrasão.

ABSTRACT

With the mechanization of agriculture, the need became the continuous improvement of agricultural machinery and implements. Thus, some problems are incessantly faced, such as the wear of mechanical components caused by contact with the grains for example. Due to the need to obtain a surface that increases the useful life of parts and components of machines and that possesses mechanical properties that are resistant to the abrasive wear, due to the contact with the rice grain with husk, a surface was covered by thermal spray Using the high velocity oxygen fuel deposition method with tungsten carbide powder on the components prepared and post-treatment with CO₂ laser, in order to obtain a better adhesion of the coating and the substrate. This coating, because of its high hardness, is highly resistant to abrasion, adhesion and erosion. It has a dense structure, with very low porosity and a very high adhesion to the substrate. The coated samples were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) to evaluate the coating morphology, optical emission spectrometry to evaluate the chemical elements present in the substrate, microhardness analysis, wear test and roughness test. The tests and analyzes showed that the WC coated samples showed better performance in microhardness, wear and roughness tests compared to samples irradiated with the laser beam.

Keywords: Thermal spray, HVOF, laser, coatings, wear abrasion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração dos principais componentes de uma colheitadeira.....	3
Figura 2 - Ilustração dos elevadores de grão e retilha TC 57.....	6
Figura 3 - Elevador de retilha com desgaste preenchido com solda.....	7
Figura 4 - Desgaste no elevador retilha.....	7
Figura 5 - Elevador do grão com desgaste.....	8
Figura 6 - Representação do processo de aspersão térmica.....	9
Figura 7 - Divisão dos processos de aspersão térmica.....	9
Figura 8 - Velocidade média de impacto das partículas.....	10
Figura 9 - Esquema de aspersão térmica por chama de pós.....	11
Figura 10 - Tocha de aspersão por chama de arame.....	12
Figura 11 - Seção transversal da tocha de aspersão por chama de arame.....	12
Figura 12 - Tocha de aspersão por chama de pós.....	13
Figura 13 - Seção transversal da tocha de aspersão por chama de pó.....	13
Figura 14 - Esquema de uma tocha de aspersão por detonação.....	14
Figura 15 - Esquema de uma tocha de aspersão oxicombustível de alta velocidade e alta pressão (HP-HVOF).....	16
Figura 16 - Tocha de aspersão HP-HVOF.....	16
Figura 17 - Esquema do processo a arco elétrico.....	18
Figura 18 - Tocha de aspersão a arco elétrico.....	18
Figura 19 - Instalação típica de um sistema de aspersão térmica por plasma.....	20
Figura 20 - Ilustração de uma tocha de aspersão por plasma.....	21
Figura 21 - Tocha de aspersão por plasma de arco não-transferido.....	21
Figura 22 - Esquema de aspersão por plasma de arco transferido (PTA).....	22
Figura 23 - Tochas usadas no processo PTA automático.....	23
Figura 24 - Modelo do resultado esperado com a sinterização a laser em função da variação da espessura da camada depositada.....	25
Figura 25 - Fluxograma do procedimento experimental.....	29
Figura 26 - Espectrômetro de emissão óptica.....	30
Figura 27 - Imagem ilustrativa das dimensões do corpo de prova.....	30
Figura 28 - Pó de Carbetto de Tungstênio utilizado ampliado 500X.....	31
Figura 29 - Braço robótico para aplicação do método HVOF.....	31

Figura 30 - Laser de CO ₂ . Na caixa retangular localizam-se os espelhos galvanométricos que guiam o feixe na superfície da amostra.	32
Figura 31 - Amostra com os seis parâmetro irradiados pelo laser.....	34
Figura 32 - Fator de sobreposição.	35
Figura 33 - Sentido de varredura do feixe de laser nas amostras: (a) sentido horizontal e (b) sentido vertical.....	36
Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura.	37
Figura 35 - Embutidora digital.	38
Figura 36 - Cortadora de precisão.	38
Figura 37 - Microdurômetro.	39
Figura 38 - Orientação das indentações.....	40
Figura 39 - Equipamento para ensaio de desgaste.....	40
Figura 40 - Equipamento de desgaste montado (a) e amostra inserida para o teste (b).	41
Figura 41 - Balança de precisão.	42
Figura 42 - Rugosímetro.....	42
Figura 43 - Imagem do pó de WC ampliada 500 X.....	44
Figura 44 - Imagem do pó de WC ampliada 4000 X.....	44
Figura 45 - Espessura do revestimento por MEV.....	45
Figura 46 - Imagens do revestimento de WC com ampliações de 28X (a), 100X (b), 800X (c) e 800X (d).	46
Figura 47 - Imagens do revestimento de WC com tratamento a Laser Contínuo de CO ₂ para os Parâmetros de 1 a 6.....	47
Figura 48 - Imagens do revestimento de WC com tratamento a Laser Pulsado de CO ₂ para os Parâmetros de 1 a 6.....	48
Figura 49 - Análise óptica Laser Contínuo.....	50
Figura 50 - Análise óptica Laser Pulsado.	51
Figura 51 - Média das microdurezas com HVOF de WC.	52
Figura 52 - Média das microdurezas com Laser Contínuo P2.	53
Figura 53 - Média das microdurezas com Laser Pulsado P1.....	53
Figura 54 - Resultados do teste de desgaste por perda de massa.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas de fontes de calor.....	10
Tabela 2 - Carta de processos Laser Contínuo.	33
Tabela 3 - Carta de processos Laser Pulsado (<i>SPOT</i>) com Potência de 100%.	34
Tabela 4 - Composição química do aço da amostra da empresa Rijeza.....	43
Tabela 5 – Resultados do teste de rugosidade.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APS - Air Plasma Spraying

AISI - American Iron and Steel Institute

EAS - Aelectric Arc Spraying

HVOF - High Velocity Oxygen Fuel

LSA - Laser Surface Alloying

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PTA - Plasma Transferred Arc

WAS - Wire Arc Spray

WC – Carbetto de Tungstênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Definição do problema	1
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Justificativa	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Equipamentos: elevador de grão e elevador retilha	3
2.2 Aspersão térmica	8
2.3 Características do pó de Carboneto de Tungstênio.....	23
2.4 Laser CO ₂	24
2.5 Desgaste	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 Materiais.....	29
3.2 Aspersão térmica HVOF do revestimento de Carbetto de Tungstênio	31
3.3 Tratamento a laser de CO ₂ do revestimento	32
3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	36
3.5 Metalografia	37
3.6 Microdureza	39
3.7 Desgaste	40
3.8 Rugosidade	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Análise Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras.....	43
4.2 Microdureza	52
4.3 Ensaio de Desgaste.....	54
4.4 Rugosidade	56
4.5 Análise de custo preliminar	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.1 Conclusões	58
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, a diversidade de opções referentes ao emprego de materiais, para obter um melhor desempenho e menor custo, fez com que o ramo da engenharia de revestimento tenha crescido consideravelmente nas últimas décadas. Sabe-se que por volta de 988 a.C. o Templo de Salomão já possuía paredes e teto inteiramente revestidos por ouro. Logo, com a evolução do uso dos metais foi-se descobrindo inúmeros modos de se revestir diferentes materiais para melhoramento das propriedades mecânicas, como, por exemplo, imersão em metal fundido.

Os métodos de aspersão térmica visam a necessidade de aumentar a vida útil de componentes e peças, permitindo o reaproveitamento dessas com deposição de materiais metálicos ou não metálicos sobre os componentes devidamente preparados. Nesse processo existem diversas variáveis envolvidas que, quando atuando juntas e propriamente aplicadas, produzem um resultado melhor do que se consideradas individualmente. O material de revestimento pode estar na forma de pó, vareta, cordão ou arame.

Para o processo de aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade, mais conhecida como HVOF (*high velocity oxygen fuel*) o material de revestimento encontra-se na forma de pó. Por meio deste método, o pó que servirá de revestimento no substrato é expelido por meio de uma tocha de aspersão específica que opera com alta pressão. Através da combustão de um combustível e oxigênio as partículas do pó são fundidas ou parcialmente fundidas e jogadas com velocidades de até 1200 m/s contra o substrato.

1.2 Definição do problema

Em geral, as colheitadeiras de arroz trabalham em média 40 a 60 dias por ano, com uma média de 8 horas de corte diárias, podendo variar entre 4 a 12 horas dependendo das condições climáticas como: sol, chuva, vento, humidade, temperatura, etc. Para o modelo de colheitadeira em estudo, teoricamente, é possível obter uma produtividade de até 200 sacos de arroz, de 50 kg cada, sem desperdício por hora. Diante disso, a colheitadeira colhe em torno de 64000 a 96000 sacos de arroz em condições adequadas de trabalho. Logo, para essa produtividade, a máquina passa a apresentar desgaste abrasivo em sua estrutura, elevador de

grão e no elevador da retilha, em um período de 2 a 3 anos de trabalho, sendo necessária a troca.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é obter uma superfície revestida por aspensão térmica através do método de deposição via HVOF e pós-tratamento com laser de CO₂ para obtenção de melhores propriedades mecânicas contra o desgaste abrasivo de componentes de máquinas agrícolas no contato com o grão de arroz.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Fazer análise metalográfica da interface entre recobrimento e substrato;
- Analisar o perfil de dureza do revestimento;
- Analisar a porosidade do revestimento;
- Analisar o desgaste do revestimento;

1.4 Justificativa

O desgaste é um dos principais problemas encontrados em peças e equipamentos de máquinas agrícolas que atuam em lavouras de cereais. Esse se dá ao fato do grão, muitas vezes, apresentar uma textura que o torna abrasivo, como no caso do grão de arroz com casca. Desta forma, os equipamentos que apresentam contato direto com o grão virão a ter uma vida útil inferior em relação às demais peças.

Segundo Richard de Medeiros Castro *et al* (2015) a aplicação do revestimento metálico de carboneto de tungstênio através da aspensão térmica irá aumentar a durabilidade e diminuir o desgaste abrasivo. Logo esse procedimento pode ser aplicado em equipamentos e peças de máquinas agrícolas que apresentam contato com o grão de arroz para ratificar sua finalidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

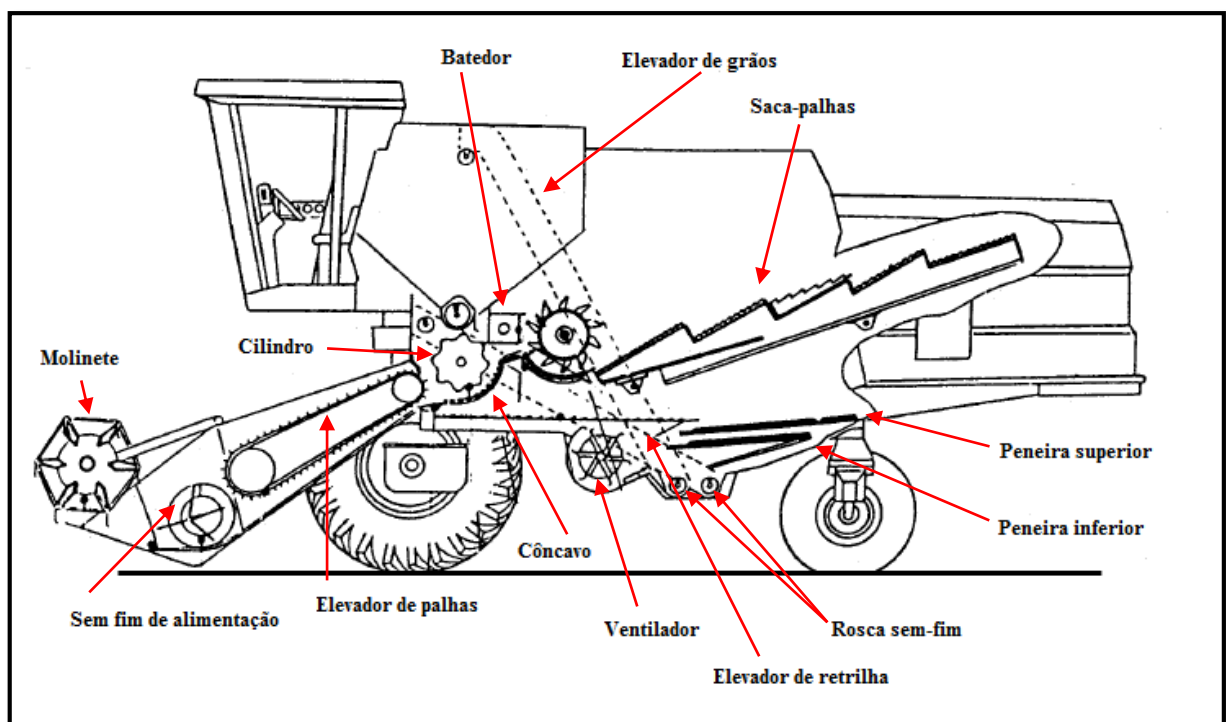
2.1 Equipamentos: elevador de grão e elevador retrilha

Para dar uma visão clara e simples de como funciona uma colheitadeira, é descrito a seguir o funcionamento básico da máquina. A Figura 1 ilustra os principais componentes de uma colheitadeira.

A colheitadeira desempenha cinco funções básicas, a saber:

- Alimentação;
- Debulha;
- Separação;
- Limpeza;
- Armazenamento e descarga de grãos.

Figura 1 - Ilustração dos principais componentes de uma colheitadeira.



Fonte: Adaptado do manual do operador New Holland TC55 e 57.

Alimentação:

O molinete com um movimento rotativo, alinha, puxa e deita as plantas sobre a plataforma de corte, enquanto a barra de corte (também chamada de faca ou navalha) com um movimento lateral de “vai e vem” corta as hastes.

O material é levado para o centro do sem-fim de alimentação, de onde é conduzido pelos dedos retráteis, para a boca do elevador de palhas. O elevador de palhas conduz o material ao cilindro de debulha e côncavo passando antes sobre o coletor de pedras. O coletor de pedras está projetado para retirar pedras e outros objetos estranhos que possam danificar componentes internos da colheitadeira.

Neste ponto está completa a ação de alimentação e começa a debulha.

Debulha:

A debulha se realiza quando a cultura passa entre as barras estriadas ou dentes do cilindro e o côncavo.

O cilindro com seu movimento rotativo, esfrega a cultura contra as barras e os arames ou dentes do côncavo, separando assim os grãos da palha.

A grande maioria dos grãos são separados da palha nesta área e caem através das aberturas do côncavo sobre o bandejão.

Separação:

A maior parte da palha e os grãos remanescentes passam ao batedor, que realiza outra ação de separação. A palha e os grãos ainda não separados são lançados ao “*rotary separator*”, um exclusivo segundo elemento de debulha e separação da New Holland, o qual separa mais grãos da palha, permitindo que caiam sobre o bandejão, e a palha é então lançada para os saca-palha.

A cortina retardadora impede que a palha seja lançada além do primeiro degrau dos saca-palhas, aumentando assim a ação de separação e evitando que o restante dos grãos caia, fora da máquina.

Os saca-palhas, mediante seu movimento rotativo alternado, separam os grãos remanescentes na palha, conduzindo-os ao bandejão, e lançando a palha para fora da máquina. Os grãos, palha curta e palhiço serão levados pelo movimento do bandejão à caixa de peneiras, onde ocorrerá a limpeza com a ajuda do ventilador.

Limpeza:

A caixa de peneiras é composta de: uma peneira superior, uma peneira inferior e um ventilador.

O movimento de “vai e vem” do bandejão transporta os grãos e palhiço à parte dianteira da peneira superior, onde se dá a ação de limpeza. O palhiço e a palha miúda são assoprados para fora da máquina.

Os grãos, um mínimo de palhiço e palha curta caem sobre a peneira inferior, onde se realiza a ação final de limpeza. A corrente de ar produzida pelo ventilador se dirige para as peneiras, orientada pelos defletores ajustáveis, que dissipa o palhiço.

O palhiço e a palha não debulhados que caem pela peneira superior, serão levados ao sem-fim de retilha e enviados ao cilindro, através do elevador de retilha, para outro ciclo de debulha.

Armazenagem e descarga:

Os grãos limpos caem na caixa de grãos e são transportados pelo sem-fim para o elevador de grãos e tanque graneleiro. Vagens parcialmente debulhadas retornam para o sistema de debulha, através do elevador de retilha.

A descarga dos grãos é efetuada através do tubo de descarga selado, esvaziando rapidamente e em qualquer posição, o tanque graneleiro.

Sabe-se agora, de forma simples, como a colheitadeira de arroz funciona e como o equipamento em estudo trabalha. A Figura 2 ilustra os elevadores de grão e retilha de uma colheitadeira New Holland modelo TC 57 em estudo. O elevador da retilha apresenta uma largura interna de aproximadamente 12 cm e um comprimento com cerca de 2,60 m, já o elevador de grão apresenta uma largura interna de 16 cm e um comprimento de 3,60 m.

Figura 2 - Ilustração dos elevadores de grão e retilha TC 57.



Fonte: Autoria própria.

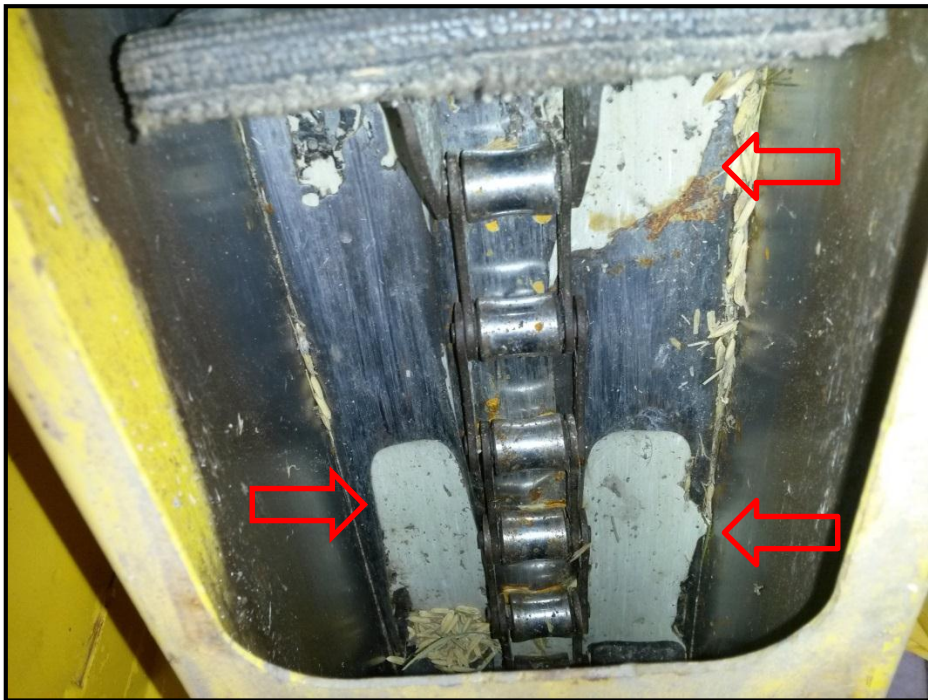
As Figuras 3 e 4 mostram o desgaste abrasivo ocorrido pela passagem do grão de arroz dentro do elevador de retilha e na Figura 5 no elevador do grão. É nesse local, que se apresenta o desgaste, onde a aspensão térmica de carboneto de tungstênio pode ser aplicada.

Figura 3 - Elevador de retilha com desgaste preenchido com solda.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Desgaste no elevador retilha.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Elevador do grão com desgaste.



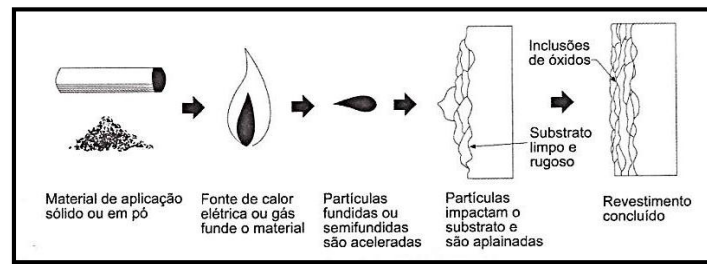
Fonte: Autoria própria.

2.2 Aspersão térmica

Aspersão Térmica, ou “Thermal Spray” é um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não metálicos, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semi-fundida sobre um substrato preparado, formando um depósito aspergido.

O material a ser aspergido pode se encontrar na forma de pó, arame, cordão ou vareta. A pistola de aspersão gera o calor necessário, utilizando gases combustíveis ou um arco elétrico. Os materiais sólidos, quando aquecidos, mudam para um estado plástico ou fundido e são acelerados por um gás comprimido. Os vapores de partículas confinadas são impelidos para o substrato. As partículas são propelidas no estado fundido ou semi-fundido, as quais formam o revestimento ao se aderir ao substrato devidamente preparado. Uma representação geral pode ser vista na Figura 6.

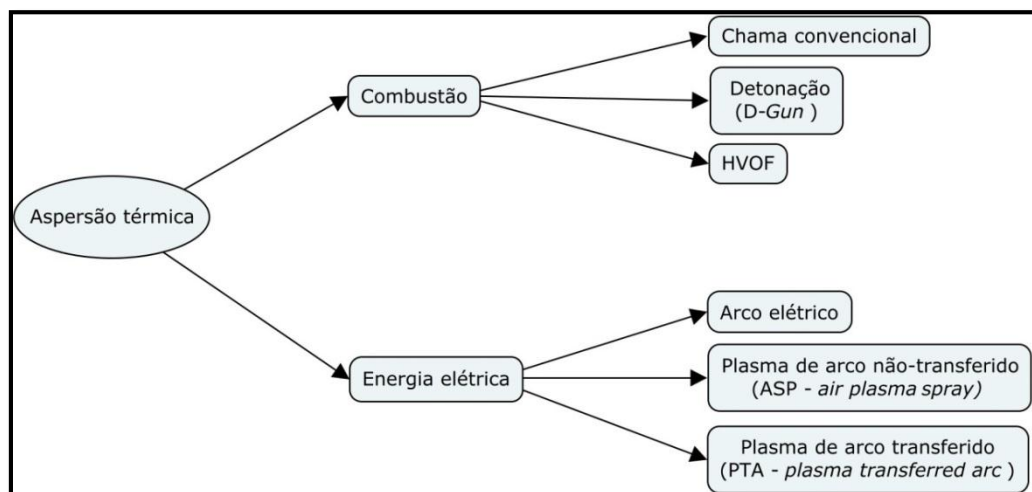
Figura 6 - Representação do processo de aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Os processos de aspersão térmica são divididos em dois grupos diferenciados por meio do método de geração de calor. A geração de calor pode ser através de gases combustíveis ou energia elétrica. A Figura 7 mostra a divisão dos processos.

Figura 7 - Divisão dos processos de aspersão térmica.

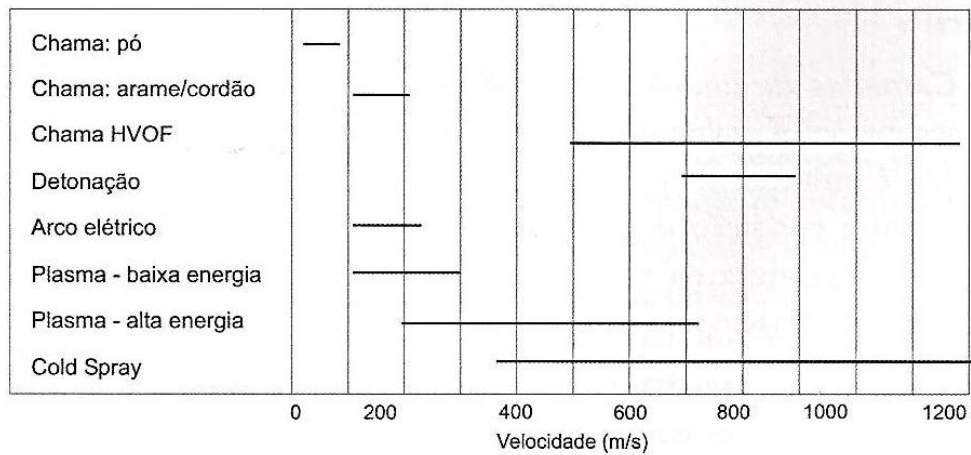


Fonte: Autoria própria.

Os processos se diferem devido ao material consumível a ser aplicado, podendo ser na forma de pó, vareta, cordão ou arame, ao método de geração de calor como já foi dito anteriormente e ao método de aceleração das partículas em direção ao substrato.

A estrutura dos revestimentos é de caráter lamelar, mas exhibe características variáveis, dependendo do processo, da técnica empregada e do tipo de material aplicado. A densidade do depósito aspergido varia de acordo com a velocidade das partículas e com a temperatura da fonte de calor do processo de revestimento. A velocidade pode variar desde 30 m/s até perto de 1200 m/s, em função do processo utilizado, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Velocidade média de impacto das partículas.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

A temperatura pode variar de pouco mais de 2000 até 28000°C em função da fonte de calor, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Temperaturas de fontes de calor.

Fonte	Temperatura (°C)
Propano, oxigênio	2526 – 2640
Gás natural, oxigênio	2538 – 2735
Hidrogênio, oxigênio	2660 – 2690
Propileno, oxigênio	2843
MAPP, oxigênio	2927
Acetileno, oxigênio	3087 – 3100
Arco plasma	2200 – 28000

Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

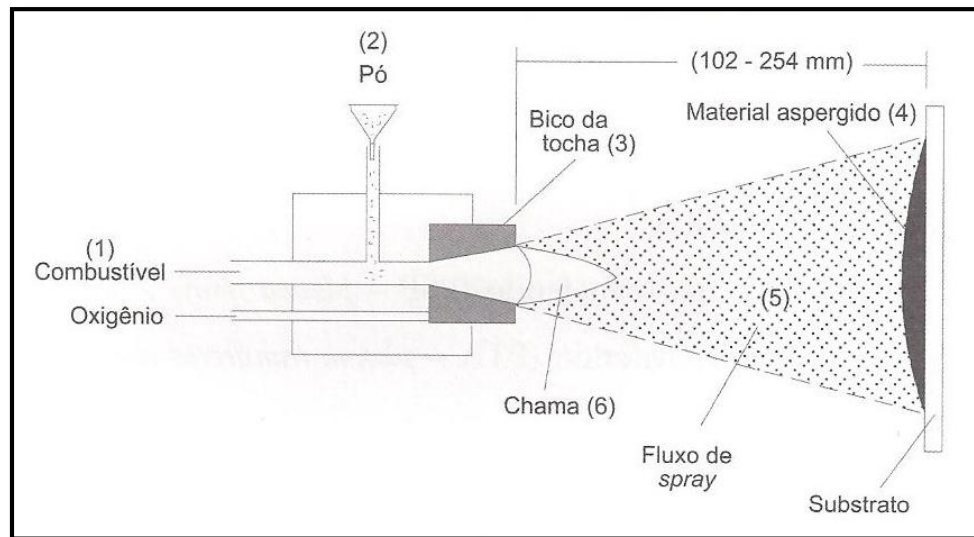
- **Aquecimento por combustão:**
Combustão por chama convencional

Usa a energia química de combustão de um gás combustível em oxigênio como fonte de aquecimento para fundir o material de revestimento. Quando utiliza pó como consumível, o método é chamado de aspersão por chama de pó (*flame powder spray*) e no caso do consumível estar na forma de arame, é denominado de aspersão por chama de arame (*wire*

flame spraying). O princípio de funcionamento pode ser observado na Figura 9, ilustrando o uso de pós como material de alimentação.

A entrada de gás é axial (1), o pó (2) é introduzido axialmente ou radialmente na tocha (3). Arames ou varetas podem ser usados ao invés de pós, sendo introduzidos axialmente. As partículas de material são fundidas na chama (4) e aceleradas em direção ao substrato (5). A relação de mistura oxigênio-combustível pode variar na faixa de 1:1 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 100 m/s.

Figura 9 - Esquema de aspersão térmica por chama de pós.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

As tochas de aspersão por chama, em sua maioria, são adaptadas para usar diversas combinações de gases, otimizando os custos e a qualidade do revestimento. Os gases comumente usados são: acetileno, propano, metil-acetileno-propadieno (MAPP) e hidrogênio, combinados juntamente com oxigênio. O acetileno é, certamente, o mais utilizado, pois possibilita temperaturas de chama maiores, além de ter baixo custo. Os materiais podem estar na forma de arames, varetas, cordões (tubos plásticos contínuos preenchidos com pós especiais) ou pós. Praticamente, são necessárias as mudanças do bico e da “tampa de ar” (*air cap*) para a tocha se adaptar a diferentes ligas, gases ou tamanhos de arame.

As Figuras 10 e 12 mostram tochas de aspersão por chama de arames e pós, respectivamente. As Figuras 11 e 13 apresentam as respectivas seções transversais das tochas de aspersão por chama de arame e pó. Para propósitos práticos, as tochas de arame, vareta ou

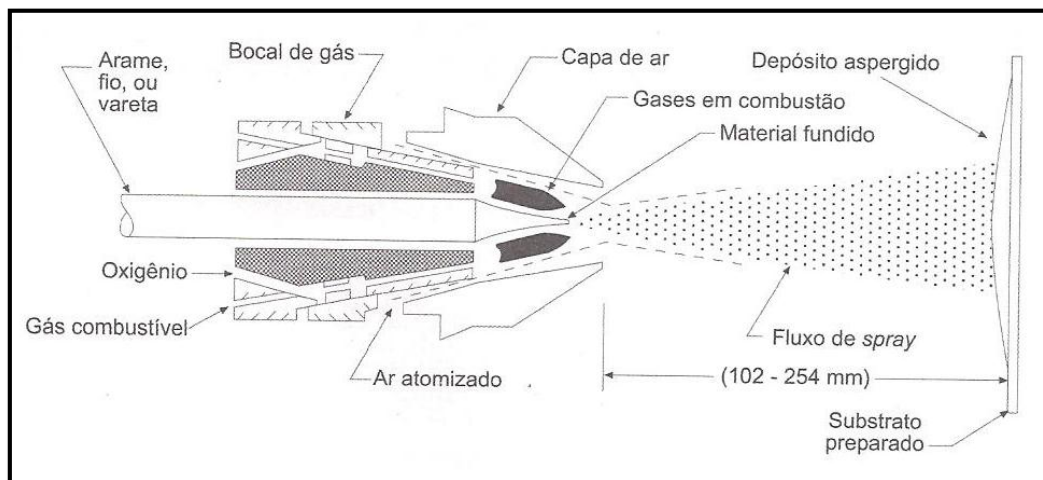
cordão são similares. As características e temperaturas de chama dependem da proporção oxigênio-gás combustível e das pressões.

Figura 10 - Tocha de aspersão por chama de arame.



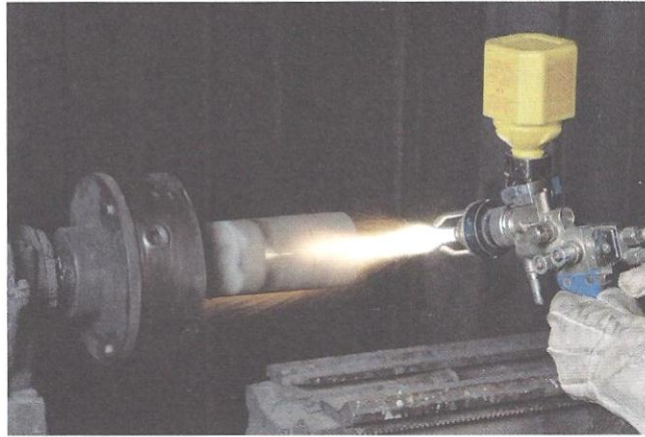
Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 11 - Seção transversal da tocha de aspersão por chama de arame.



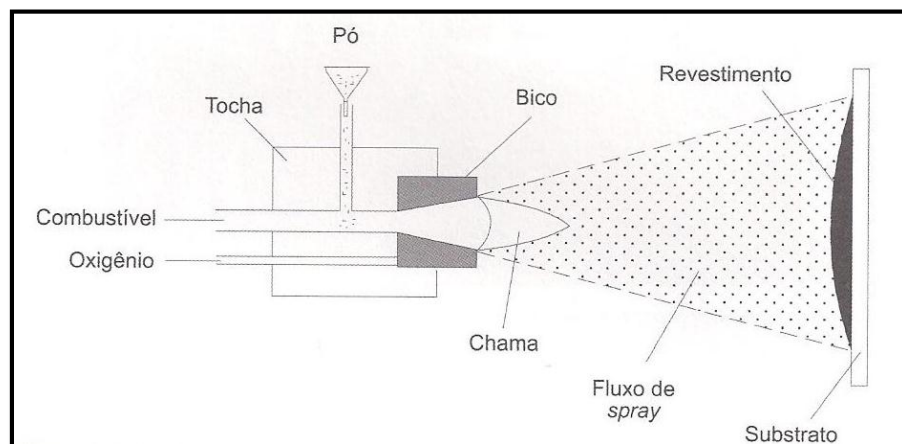
Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 12 - Tocha de aspersão por chama de pós.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 13 - Seção transversal da tocha de aspersão por chama de pó.



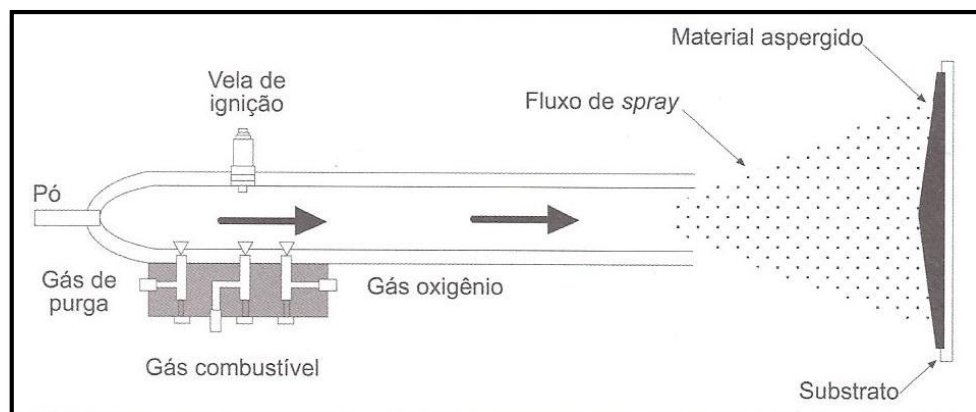
Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

A distância de aspersão, distância entre a extremidade da tocha e o substrato (*stand off distance*), varia normalmente na faixa de 120 a 250 mm, com um ângulo de trabalho usualmente de 90° (chama perpendicular ao substrato), que pode ser alterado em função da forma do substrato. A atmosfera de aplicação dos revestimentos é, em geral, ar. A resistência adesiva (adesão) alcança 60 MPa para revestimentos de Ni-Al aspergidos por chama convencional, ou até 70 MPa para ligas autofluxantes. Os valores típicos estão na faixa de 15 MPa para revestimentos cerâmicos e 30 MPa para outros materiais. A porosidade é de 10 a 20%, podendo ser praticamente zero para os revestimentos autofluxantes. As espessuras de aplicação típicas variam de 100 a 2500 μm (0,1 a 2,5 mm).

Aspersão por detonação (*D-Gun*)

Utiliza a energia da explosão de misturas oxigênio-acetileno para aquecer e impelir materiais em pó para a superfície do substrato que será revestido. O depósito resultante é extremamente duro, denso e bem aderente. A tocha de detonação consiste de um cano longo de onde é introduzida uma mistura de oxigênio e gás combustível, em geral acetileno, e material de revestimento em pó. Feita a ignição da mistura de gases, através de uma vela elétrica apropriada, uma onda de detonação controlada, de alta pressão e alta temperatura, acelera e aquece as partículas de pó enquanto as expulsa do cano da tocha. A velocidade de saída é em torno de 760 m/s. Este é um processo cíclico, e após cada injeção individual de pó ter sido descarregada, um pulso de gás nitrogênio purga o cano e a câmara da tocha. Detonações múltiplas a cada segundo (até 10 vezes) permitem a deposição do revestimento até a espessura desejada. Um esquema da tocha por detonação é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de uma tocha de aspersão por detonação.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Ao invés de um leque contínuo de revestimento, como em outros processos de aspersão térmica, a cada detonação se obtém um círculo de revestimento de 25 mm de diâmetro e poucos micrômetros de espessura. Uma espessura uniforme é conseguida pela precisa sobreposição destes círculos em muitas camadas. Temperaturas em torno de 3315°C são atingidas dentro da tocha de detonação, enquanto a do substrato é mantida abaixo de 150°C por um sistema e resfriamento à base de dióxido de carbono líquido.

As espessuras dos revestimentos obtidos por este processo estão na faixa de 0,005 a 0,5 mm, mais finos ou muito mais grossos também podem ser obtidos. A aspersão por

detonação, trabalhando com pressões da ordem de 1 MPa (150 psi) e temperaturas de cerca de 4000°C, tem um dos mais altos valores de adesão ao substrato (resistência adesiva), usualmente acima de 69 MPa, o que representa praticamente o limite de resistência do adesivo epóxi usado nos testes. Apresenta, também, uma das mais baixas porosidades em relação aos demais processos de aspersão térmica, menos de 2%. Estes fatos se devem às altíssimas velocidades imprimidas às partículas durante o processo e conseqüente energia cinética liberada no impacto com o substrato. Além disso, estas velocidades permitem que a maioria dos revestimentos seja depositada com tensões residuais compressivas, ao invés de tensões residuais de tração, típicas da grande parte dos processos de aspersão térmica. Isto é particularmente importante em relação às limitações de espessuras dos revestimentos e o efeito sobre as propriedades de fadiga do substrato.

O processo produz um nível de ruído acima de 150 dB, sendo, por conseqüência, instalado em ambientes com proteção acústica. A operação de revestimento com este equipamento é completamente automatizada e controlada remotamente. A baixa porosidade permite ótimos trabalhos de acabamento por retificação.

Praticamente todo material metálico, cerâmico ou metal-cerâmico é depositado por este processo. Alguns exemplos são alumina, alumina-titânia, carboneto de cromo, carboneto de tungstênio e ligas. Os revestimentos por detonação são usados extensivamente para aplicações de resistência ao desgaste e à corrosão, assim como para muitas outras aplicações.

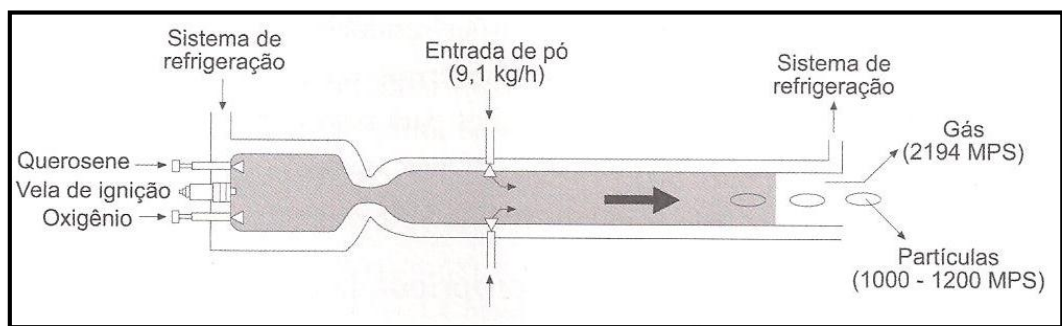
Oxicombustível de alta velocidade (HVOF)

Segundo Pawlowski o processo de aspersão oxicombustível de alta velocidade, mais conhecida como HVOF (*high velocity oxygen fuel*) foi desenvolvida no final da década de 1970 e início de 1980, sendo os trabalhos iniciais produzidos na Thayer School of Engineering, em Hanover, NH, EUA, e pela Browning Engineering em West Lebanon, NH, EUA. Nos sistemas HVOF de primeira geração (*CDS, top gun, jet-kote e diamond jet*), a combustão ocorre na faixa de 3-5 bar e a chama alcança uma velocidade supersônica no processo de expansão no bocal de saída. Os de terceira geração (*DJH 2600, DJH 2700, JP-5000, OSU carbide jet e top gun K*) operam com pressões de combustão mais altas, de 6-10 bar. Sua construção permite alcançar maiores velocidades de partículas quando comparadas com as velocidades dos outros sistemas.

Neste processo, o gás combustível é queimado com oxigênio a alta pressão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade. O combustível é, usualmente, propano, propileno,

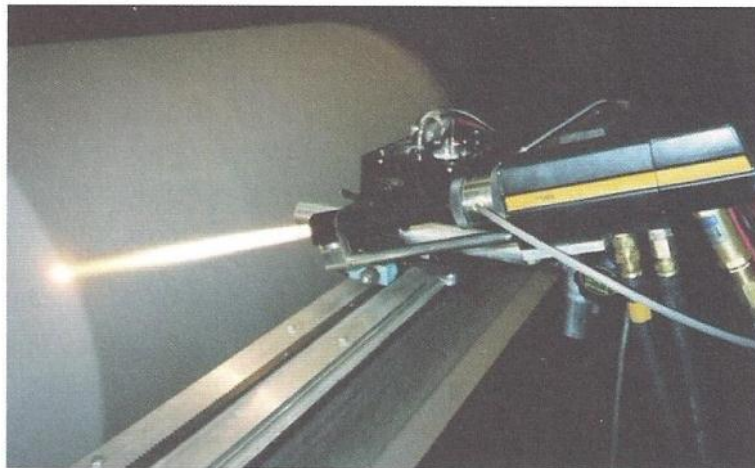
metil-acetileno-propadieno ou hidrogênio. É misturado com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão. Os produtos de combustão são liberados e se expandem através de um bocal, onde as velocidades do gás se tornam supersônicas. O pó é introduzido no bocal, em geral axialmente, e é aquecido e acelerado para fora do mesmo. A câmara de combustão e o bocal são resfriados a água. A Figura 15 mostra, esquematicamente, uma tocha HVOF. Uma tocha real, de um sistema de alta pressão HP-HVOF, é observada na Figura 16.

Figura 15 - Esquema de uma tocha de aspersão oxicomcombustível de alta velocidade e alta pressão (HP-HVOF).



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 16 - Tocha de aspersão HP-HVOF.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

O pó é normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas. Velocidades do gás têm sido medidas na faixa de 1500 a 2000 m/s. A literatura técnica indica velocidades de partículas de 550 a 800 m/s. A temperatura da chama é relativamente baixa, da ordem de 2900°C, tornando difícil a aspersão de cerâmicas e alguns metais refratários. Em alguns

equipamentos, querosene líquido é usado como combustível e ar como oxidante. A literatura menciona que estes sistemas que utilizam querosene fornecem as mais altas pressões de combustão e velocidades de partículas entre todos os sistemas HVOF. As altas velocidades de impacto das partículas sobre o substrato implicam que as partículas não necessitam estar completamente fundidas para 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. O processo via HVOF tem sido principalmente utilizado em aplicações para resistência ao desgaste, mas o emprego vem se expandindo muito nos últimos anos.

O tamanho das partículas de pó usado no processo HVOF é usualmente de 5 a 45 μm . A taxa de alimentação de pós varia de 20 a 80 g/min. O pó é geralmente injetado na direção axial e, em algumas tochas, radialmente, utilizando nitrogênio como gás de arraste. A distância de aspersão é de 120 a 300 mm e outros parâmetros, como a preparação do substrato, são similares ao processo de aspersão térmica a plasma de arco não-transferido. As taxas de fluxo de gás combustível estão entre 40 a 60 l/min e o fluxo de oxigênio é correspondentemente bem maior, chegando a até 430 l/min. A maioria dos pós aspergidos é formada de carbonetos, principalmente de tungstênio e cromo. O nível de ruído é bastante alto, excedendo a 140 dB.

Embora este processo tenha sido desenvolvido como uma alternativa ao de aspersão por detonação aparece hoje como opção ao de aspersão a plasma em algumas aplicações. Além da qualidade do revestimento e tensões residuais menores, outras vantagens incluem eficiência do depósito, reduzida sensibilidade ao ângulo de aspersão e menos variáveis críticas de processo.

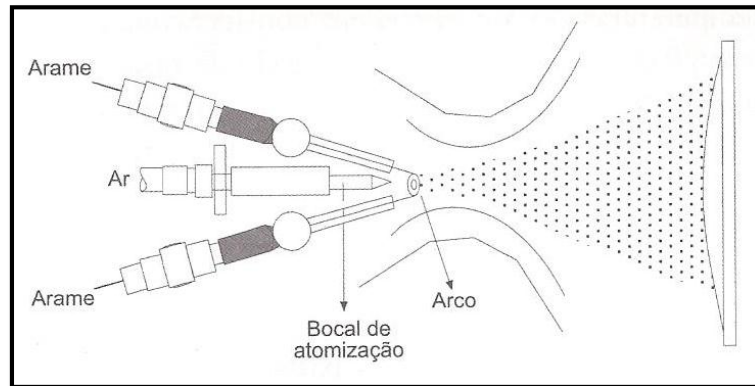
- **Aquecimento por energia elétrica:**

- Arco elétrico**

Na aspersão térmica a arco elétrico, EAS (*electric arc spraying*), também conhecido como arco arame, WAS (*wire arc spraying*), dois eletrodos consumíveis de arame, que são isolados um do outro, avançam automaticamente para se encontrar em um ponto em uma névoa de gás atomizador. Uma diferença de potencial entre 18 e 40 V é aplicada através dos arames, iniciando um arco elétrico que funde as pontas dos arames eletrodos. Um gás, usualmente ar comprimido, é dirigido através da zona do arco, atomizando o metal fundido e projetando as partículas sobre um substrato preparado. Para aplicações especiais, gases inertes

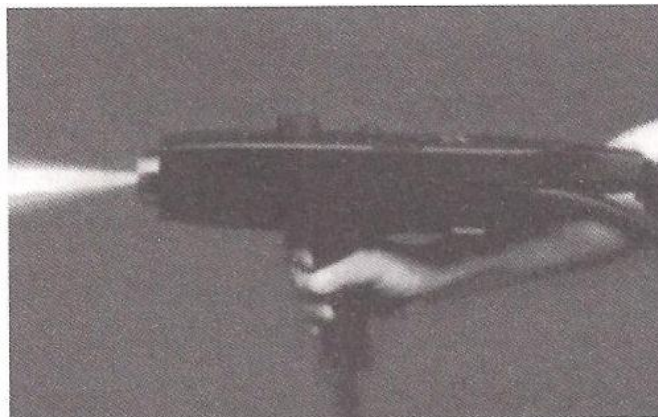
como argônio e hélio podem ser usados ao invés do ar comprimido, com a finalidade de reduzir a oxidação do revestimento. A energia elétrica está na faixa de 5 a 10 kW. Um esquema do processo a arco elétrico é apresentado na Figura 17. Uma tocha real é mostrada na Figura 18.

Figura 17 - Esquema do processo a arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 18 - Tocha de aspersão a arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Este processo difere dos outros processos de aspersão térmica nos quais não há fonte externa de calor, tais como chama de gás ou plasma induzido eletricamente. Aquecimento e fusão ocorrem quando os arames (que são o próprio material a ser aspergidos) carregados eletricamente com cargas opostas (um é positivo, ânodo, o outro negativo, cátodo) são alimentados conjuntamente e um arco controlado é gerado na sua interseção. Os diâmetros dos arames estão, tipicamente, na faixa de 1,2 a 5 mm. Um fator limitante é que o material a ser usado tem que ser eletricamente condutivo.

Cabos de energia isolados eletricamente conectam a pistola à fonte de energia de corrente alternada. Pistolas ou tochas também incluem mecanismos para alimentação dos arames a taxas controladas. Pontas de contato são dimensionadas para diâmetros específicos de arames. Chaves liga-desliga também são colocadas nas pistolas para controlar a alimentação dos arames, suprimento de ar comprimido e de energia elétrica.

As temperaturas do arco excedem consideravelmente os pontos de fusão dos materiais aspergidos. Durante o ciclo de fusão, o metal aspergido é superaquecido até um ponto onde pode ocorrer alguma volatilização, especialmente com alumínio e zinco. As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Estas reações formam pequenas zonas “soldadas”, levando a um revestimento com boa resistência adesiva e coesiva. Resistências adesivas acima de 69 MPa são conseguidas para alguns materiais. Um efeito negativo do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência de mudar a composição das ligas aplicadas, devido à oxidação seletiva ou à vaporização, e da ocorrência simultânea dos dois fenômenos. A natureza destes efeitos é bastante complexa, mas poder ser minimizada pela criteriosa seleção da composição do arame.

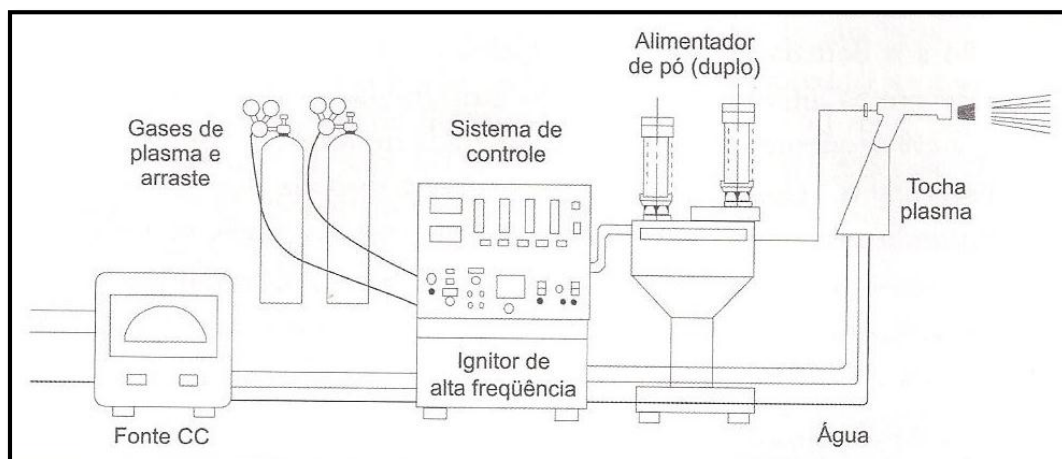
A aspersão a arco elétrico apresenta normalmente maiores taxas de aspersão do que outros processos. Os fatores que controlam a taxa de aplicação são a corrente da fonte de energia e a taxa de alimentação de arame permissível para utilizar a energia disponível. Taxas de deposição de até 55 kg/h têm sido alcançadas para algumas ligas à base de níquel. O aquecimento do substrato é menor que na aspersão por chama, principalmente por não haver uma chama tocando o substrato.

Plasma de arco não-transferido (APS)

A aspersão térmica por plasma (APS ou *air plasma spraying*) utiliza o calor de um arco plasma para fundir os materiais de revestimento, na forma de pó. O termo “arco plasma” é empregado para descrever uma família de processos de trabalho em metais que usam um arco elétrico constringido para fornecer energia térmica de alta densidade. A constrição do arco é usualmente conseguida forçando-o através de um orifício em um ânodo de cobre refrigerado a água. O propósito desta constrição é controlar e aumentar a densidade de energia do fluxo do arco. Na aspersão por plasma, um arco elétrico “não-transferido” é constringido entre um eletrodo de tungstênio coaxialmente alinhado e um bocal de constrição. A zona central do plasma é constituída pelo gás inerte ionizado (em geral argônio, podendo ser

também nitrogênio) envolvido por um ou mais gases inertes de proteção (argônio, hélio, hidrogênio, nitrogênio ou mistura). A Figura 19 ilustra uma instalação completa de um sistema de aspersão térmica por plasma de arco não-transferido.

Figura 19 - Instalação típica de um sistema de aspersão térmica por plasma.



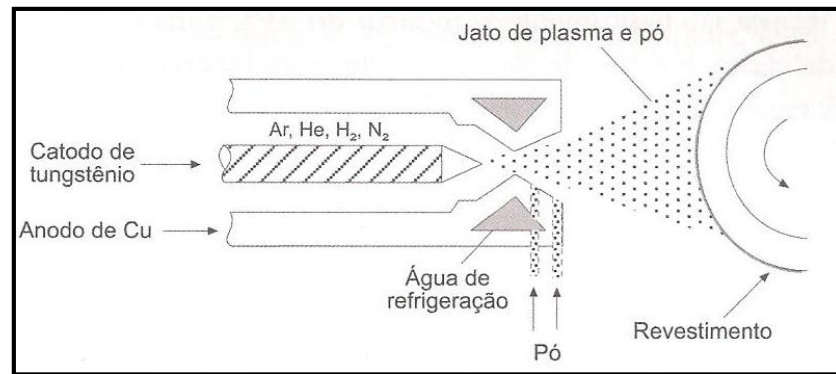
Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Durante o aquecimento, o gás é parcialmente ionizado, produzindo um plasma. Quando esse sai da pistola, moléculas dissociadas de um gás diatômico recombinaem e liberam calor. O pó é introduzido no plasma, fundido e propelido para o substrato através de um fluxo de alta velocidade. O conteúdo de calor, a temperatura e a velocidade do jato plasma são controlados pelo tipo de bocal, corrente do arco, razão de mistura dos gases e taxa de fluxo de gás. O arco opera com corrente contínua de uma fonte de energia tipo retificadora. A energia elétrica para o arco é conduzida por uma unidade de controle central que também regula o fluxo de gás de plasma e da água de refrigeração, e a sequência desses elementos para a precisão do processo. Os níveis de energia nas tochas de aspersão por plasma estão, usualmente, na faixa de 30 a 80 kW, podendo chegar até 120 kW. O nível de ruído acima de 140 dB exige, portanto, instalação em ambiente com isolamento acústico.

Uma tocha de plasma é ilustrada, esquematicamente, na Figura 20. A Figura 21 mostra uma tocha de plasma de arco não-transferido real. Um gás, usualmente argônio, ou nitrogênio, hidrogênio e hélio, é introduzido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre refrigerado a água. Um arco elétrico é iniciado entre os dois eletrodos usando uma descarga de alta frequência e, então, mantém-se utilizando uma fonte de energia de corrente alternada. O arco ioniza o gás, criando um gás de plasma de alta pressão. O aumento da temperatura,

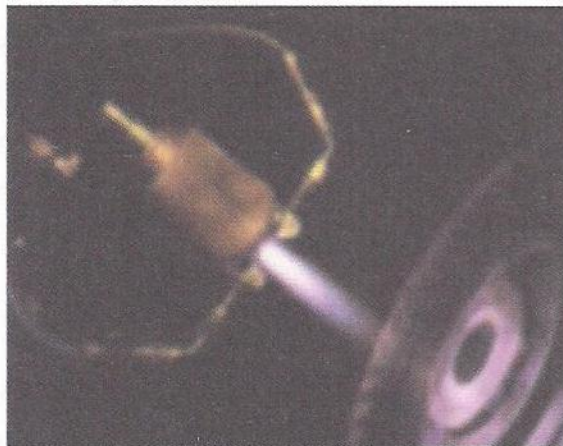
que pode exceder 17000°C , eleva também seu volume e, por isso, sua pressão e velocidade na saída do bocal.

Figura 20 - Ilustração de uma tocha de aspersão por plasma.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 21 - Tocha de aspersão por plasma de arco não-transferido.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

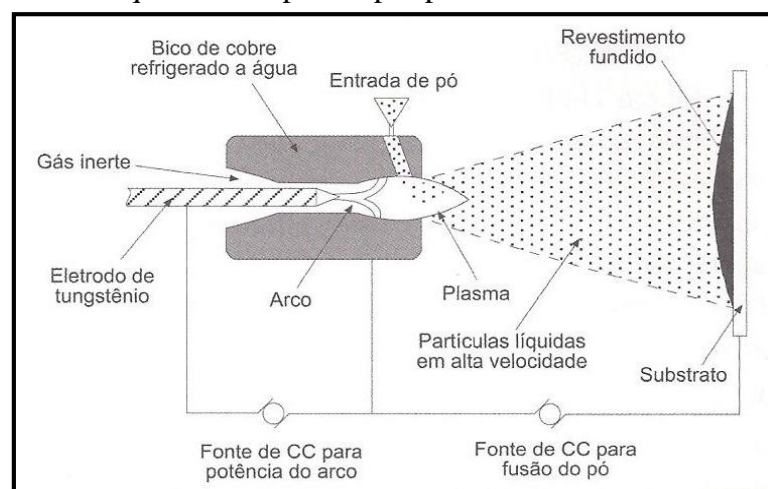
A velocidade do gás, que pode ser supersônica, não deve ser confundida com a das partículas. O projeto da tocha e os parâmetros de operação são críticos na determinação da temperatura e velocidade alcançada pelas partículas de pó. Os parâmetros de operação incluem não apenas os fluxos de gases, níveis de energia, taxa de alimentação de pó e fluxo do gás de arraste, mas também a distância da tocha ao substrato (distância de aspersão) e o ângulo de deposição. São citadas velocidades de partículas de 300 m/s, para um sistema de 40 kW, e 500 m/s, para um de 80 kW.

Plasma de arco transferido (PTA)

A aspersão a plasma de arco transferido, mais conhecida como PTA (*plasma transferred arc*), adiciona ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. É praticamente uma combinação de soldagem e aspersão térmica. A Figura 22 é uma representação esquemática da PTA. Neste, uma corrente secundária é estabelecida entre o eletrodo da tocha e a peça de trabalho condutora (substrato). A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material de adição pode estar na forma de pó (mais comum) ou arame. A Figura 23 mostra dois tipos de tochas para aspersão por plasma de arco transferido, usadas em equipamentos automáticos.

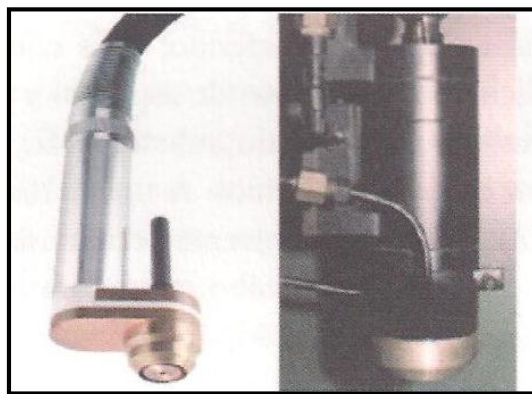
Entre as vantagens resultantes deste equipamento direto, citam-se ligação metalúrgica (é essencialmente uma técnica de soldagem com baixa diluição do metal base, tipicamente na faixa de 10%), alta densidade dos revestimentos, elevadas taxas de deposição e maiores espessuras por passe. Pode-se conseguir espessuras de 0,5 a 6 mm e larguras de até 32 mm em um único passe, com taxas de alimentação de pó de 9 kg/h. A ausência de escória e a presença de uma atmosfera de proteção gasosa permitem um revestimento uniforme e livre de impurezas. Ainda neste processo, menos energia é necessária, quando comparado ao de arco não-transferido. Para aplicação de alguns carbonetos, por exemplo, a aspersão por plasma de arco transferido usa em torno de 5% da energia necessária no a arco não-transferido, para o mesmo volume de deposição.

Figura 22 - Esquema de aspersão por plasma de arco transferido (PTA).



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Figura 23 - Tochas usadas no processo PTA automático.



Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007).

Uma das limitações deste processo é o fato de haver aquecimento e fusão superficial do substrato como parte do processo, alguma alteração da microestrutura é inevitável. As aplicações são também restringidas a substratos eletricamente condutivos e que suportam alguma deformação.

2.3 Características do pó de Carboneto de Tungstênio

Carbeto de tungstênio (ou Carboneto de tungstênio) é o carbeto de fórmula química WC. É um composto químico inorgânico, pertencente ao grupo dos materiais cerâmicos, que contém partes iguais de carbono e tungstênio, empregado como refletor de nêutrons. Na sua forma mais básica encontra-se como um pó fino cinzento, mas que pode ser moldado sobre pressão em várias formas para ser usado em máquinas industriais, ferramentas, abrasivos e também em joalheria.

Segundo Krishna, B. V. *et al* (2002) o carboneto de tungstênio pertence ao grupo dos materiais cerâmicos de grande importância industrial. Possui um conjunto único de propriedades que inclui alto ponto de fusão, resistência ao desgaste, alta resistência ao choque térmico, condutividade térmica e boa resistência à oxidação.

Segundo Ybarra, L. C. A. *et al* (2008) o carboneto de tungstênio apresenta elevada temperatura de fusão (2800°C), elevado módulo de elasticidade (699 GPa), baixo coeficiente de expansão térmica ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) e elevada dureza (1800 a 2200 HV), mantendo-se relativamente estável até cerca de 1000°C. Em decorrência da estabilidade térmica e dos elevados valores de propriedades mecânicas, o WC é largamente utilizado na produção de materiais compósitos para aplicações que necessitam elevada resistência ao desgaste, como

ferramentas de usinagem e de corte, matrizes de conformação mecânica, rolamentos, selos mecânicos, contatos elétricos e recobrimentos (*coatings*) resistentes ao desgaste.

Conforme Upadhyaya, G. S. (2001) o carbeto de tungstênio constitui o principal constituinte dos chamados carbetos cimentados (*cemented carbides*). Logo, o carbeto de tungstênio cimentado é constituído por duas fases: uma formada por partículas finas e bem distribuídas de carbeto de tungstênio que são duras e frágeis e, outro, do metal ligante, relativamente tenaz e dúctil. Ambas as fases podem ser modificadas com o objetivo de alcançar certas propriedades finais desejadas.

Os carbetos cimentados, de forma geral, apresentam as seguintes características:

- Estrutura intersticial que conduz à combinação de ligações covalentes, metálicas e iônicas;
- Fases não estequiométricas;
- Propriedades físicas dos materiais cerâmicos combinadas com as propriedades eletrônicas, dos metais, isto é, elevada dureza e elevada condutividade térmica e elétrica;
- Pontos de fusão mais altos do que de qualquer grupo de materiais e,
- Alta estabilidade térmica e química.

2.4 Laser CO₂

Laser, acrônimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação).

O processo à laser possui vantagens como:

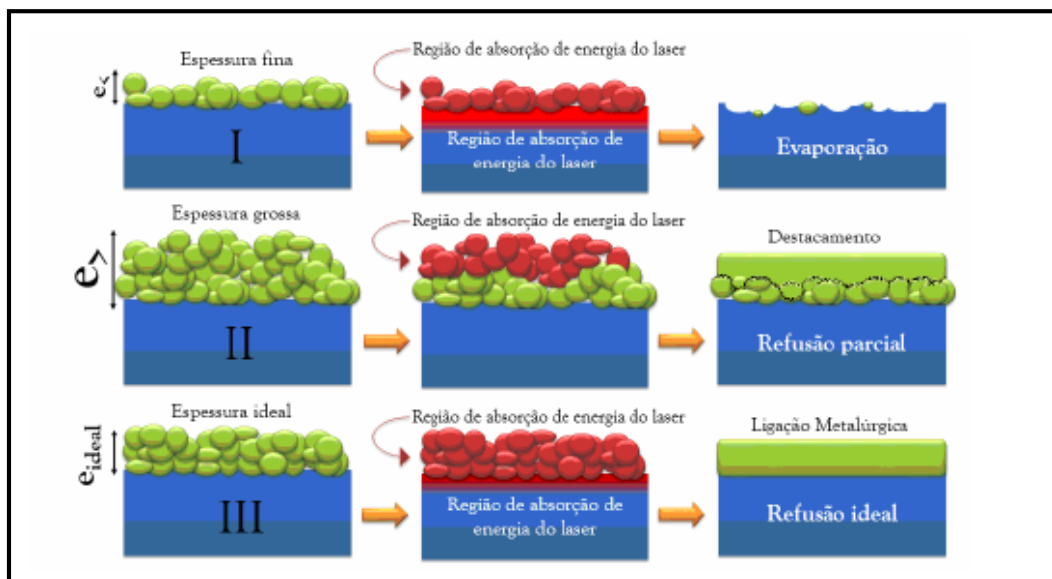
- ✓ Ligação metalúrgica perfeita entre camada superficial e substrato;
- ✓ Zona afetada termicamente reduzida, permitindo limitar ao máximo as distorções na peça;
- ✓ Taxa de resfriamento elevadas, favorecendo microestruturas extremamente finas e formação de novas fases;
- ✓ Excelente qualidade superficial, com pequeno ou nenhum custo em usinagem posterior;
- ✓ Ausência de contaminação química e de descarte de resíduos, pois nenhum líquido de resfriamento é utilizado.

Neste processo, a temperatura na superfície do recobrimento pode ser controlada pela

densidade de potência e pela velocidade de varredura do feixe. Tem a vantagem de não necessitar gasto de energia para o aquecimento do volume total da peça, tornando o processo econômico. Técnicas a laser são promissoras para deposição de revestimentos por melhorarem seu tempo de vida útil devido ao aumento da força de aderência ao substrato.

Para a definição dos parâmetros de tratamento com laser uma série de experimentos foi realizada. Irradiando-se a superfície aspergida via HVOF com um feixe de laser, com um parâmetro P1 de velocidade de varredura do feixe, resolução e certa densidade de potência, espera-se que haja um compromisso entre a espessura e a qualidade da camada do revestimento de WC, resultante desta interação, conforme apresenta o esquema da Figura 24.

Figura 24 - Modelo do resultado esperado com a sinterização a laser em função da variação da espessura da camada depositada.



Se a camada for fina, como indicado no caso I da Figura 24, toda a energia do laser será absorvida pelo revestimento, o qual será vaporizado. Se o tempo de interação entre o feixe de laser e a amostra for elevado, parte da superfície do substrato metálico também poderá ser vaporizada. Por outro lado, se a camada de revestimento pré-depositada for muito espessa (caso II da Figura 24) a energia será absorvida apenas na superfície desta camada de revestimento, que será sinterizada e é homogeneizada, mas em uma espessura insuficiente para que ocorra uma boa adesão ou ligação metalúrgica ao substrato. No caso III, existe um valor de espessura ideal em que ocorrerá tanto a fusão do revestimento como a fusão

superficial do substrato, gerando sua mistura e ligação metalúrgica quando um certo parâmetro de laser for selecionado.

Segundo Chikarakara, E. *et al* (2010) o tratamento superficial por laser é um método eficaz para alterar a microestrutura e propriedades mecânicas dos revestimentos convencionais. A modificação da superfície por laser tem sido proposta para melhorar a homogeneidade da estrutura do revestimento, porosidade e características tribológicas. Segundo eles, o processo por laser contínuo alcança valores de rugosidades e trincas mínimas em comparação com a alternativa por laser pulsante em amostras realizadas por aspersão térmica HVOF com revestimento de WC-CoCr. Afirmam também, que trincas grandes e poros dentro das amostras tratadas por laser pulsado podem ser atribuídos ao estresse térmico induzido pela rápida taxa de pulsação e ainda a irradiação com laser vêm melhorar a homogeneidade criando microestruturas altamente aglomeradas e uniformes.

Segundo Afzal, M. *et al* (2015), a fusão a laser é uma técnica bem estabelecida, muitas vezes usadas para reduzir os defeitos inerentes, tais como a porosidade, de revestimentos pulverizados. Além disso, a técnica de *laser surface alloying* (LSA) é relativamente nova e importante área de pesquisa, que também é utilizada para melhorar as propriedades resistentes ao desgaste de superfícies. O objetivo destas técnicas é de fundir completamente os poros dentro dos revestimentos logo o processo de fusão e solidificação resulta num revestimento homogêneo.

Segundo Shi Hong Zhang *et al* (2009), com o tratamento pelo calor do laser, obtém-se uma interface compacta entre o revestimento e o substrato. A rugosidade da superfície do revestimento pode vir a ter uma diminuição bem evidenciada antes e depois do aquecimento a laser. A porosidade e a espessura dos revestimentos têm uma diminuição e o conteúdo relativo de Cr_3C_2 , em análise, também teve um aumento de calor com o tratamento a laser, que corresponde ao aumento de microdureza evidentemente, o que é vantajoso para melhorar o desempenho de desgaste. Além disso, o tratamento térmico do laser é para formar, neste caso, um película densa de óxido e melhorar a coesão das fases WC, Cr_3C_2 e Ni, que resulta na melhoria no desempenho de desgaste do revestimento Cr_3C_2 -6% Ni WC-24%.

Segundo Ganeev, R. A. a utilização de um laser de CO_2 com parâmetros de potência de 100 W, diâmetro de feixe de 0,1 mm, duração de pulso de 6 ns, repetição da frequência de pulso 20 Hz e comprimento de onda 1064 nm, foi suficiente para produzir padrões de têmpera superficial em um aço carbono previamente recoberto com grafita cuja dureza resultante do tratamento por laser foi de 950 HV, com profundidade de 170 μm .

2.5 Desgaste

A utilização de revestimentos protetores tem se tornado uma forte e econômica alternativa de engenharia para que os componentes possam facear ambientes onde o desgaste esteja presente. Há três tipos básicos de desgaste que são considerados:

- Abrasivo: ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície em relação à qual estão em movimento, provocando deslocamento ou remoção de material;
- Adesivo: duas superfícies em contato por atrito sofrem deformação plástica localizada, ocorrendo uma soldagem entre as asperezas;
- Erosivo: resulta da colisão de partículas sólidas ou gotas de líquidos carregadas por um fluido contra uma superfície.

Um ensaio bastante utilizado para verificação da resistência ao desgaste é o ensaio de abrasão a três corpos, de acordo com a norma ASTM-G-65-85, que possui cinco procedimentos distintos (A, B, C, D e E) variando em relação ao tempo de aplicação e carga do ensaio. O abrasivo normalmente empregado é areia de quartzo arredondada, conforme especificações da norma. Após o ensaio, são feitas verificações da superfície desgastada através de microscopia eletrônica de varredura e outros meios auxiliares, como espectrometria de energia dispersa (EDS), etc.

O ensaio da norma ASTM G-65 é um teste de resistência à abrasão para materiais atualmente utilizados na indústria. O ensaio mede, basicamente, o desgaste devido a partículas duras forçadas contra e se movimentando sobre uma superfície sólida, similar a muitas aplicações reais.

O ensaio gera dados que permitem classificar os materiais quanto à resistência à abrasão. Os testes de abrasão são reportados como perda de volume em milímetros cúbicos. Materiais com maior resistência abrasiva apresentam menor perda de volume.

Outro ensaio de desgaste utiliza o princípio de bloco sobre anel onde o bloco de teste é pressionado contra o anel de teste que gira a uma determinada velocidade e a um determinado número de rotações. Este sistema é definido como assimétrico porque as superfícies do bloco e do anel que estão em contato de deslizamento terão taxas de desgaste quase sempre diferentes, mesmo que os materiais sejam iguais. É constituído basicamente de um sistema com pesos e alavanca para a aplicação da carga que irá pressionar o bloco de teste instalado sobre o anel de teste que gira através de um sistema de polias, correia e motor.

Segundo Henke, H. *et al* (2003), em seu trabalho sobre desenvolvimento e teste de revestimentos aplicado por aspensão térmica HVOF aplicada a moldes para telhas de concreto obteve como resultado que os revestimentos com um teor máximo de WC apresentaram a maior resistência contra o desgaste por deslizamento e rolamento por abrasão com grãos minerais duros (quartzo) combinados com excelente desempenho de deslizamento e polimento.

Segundo Voorwald H. J. C *et al* (2005), os corpos de prova revestidos com WC apresentaram menor perda de peso do que o cromo duro galvanizado considerando a resistência ao desgaste abrasivo.

Conforme Vicenzi J. *et al* (2006), o processo de aspensão térmica HVOF apresenta resultados que indicam melhor resistência ao desgaste erosivo para WC-12Co e WC-Cr₃C₂-Ni em comparação com o aço nu.

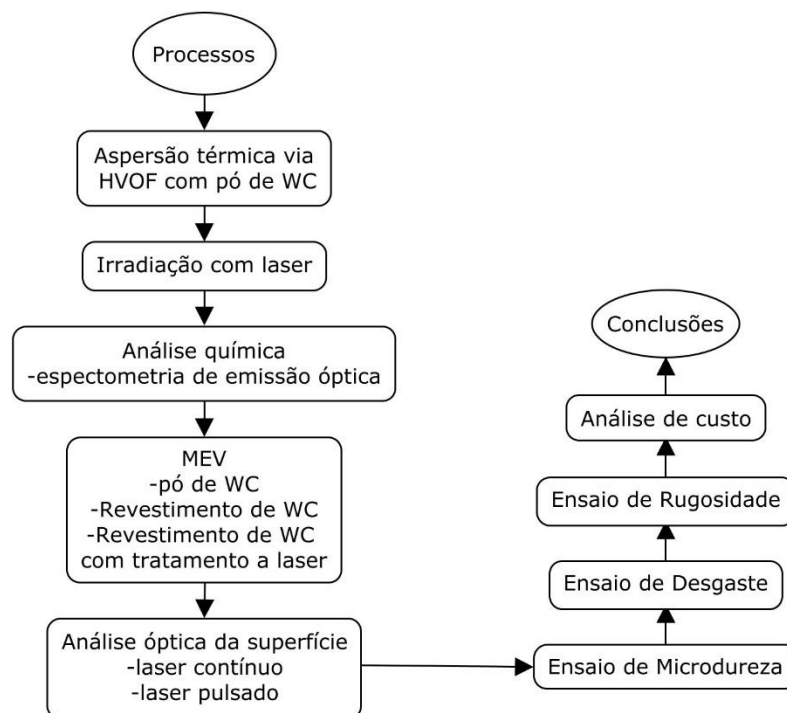
Segundo Mateos J. *et al* (2000) o tratamento a laser produz um aumento considerável na microdureza dos revestimentos e produz também aumento de dureza na base metálica (substrato) quando essa é afetada pela radiação do laser de CO₂. Logo, os autores afirmam que as amostras com revestimento de WC e com o revestimento de WC tratadas com laser apresentam menor perda de massa no ensaio de desgaste comparado a amostra de aço.

3 METODOLOGIA

Para obtenção dos objetivos propostos neste trabalho e relacionar a teoria com a parte experimental serão realizados os ensaios metalográficos, de microdureza, desgaste e rugosidade.

A Figura 25 apresenta o fluxograma do procedimento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 25 - Fluxograma do procedimento experimental.

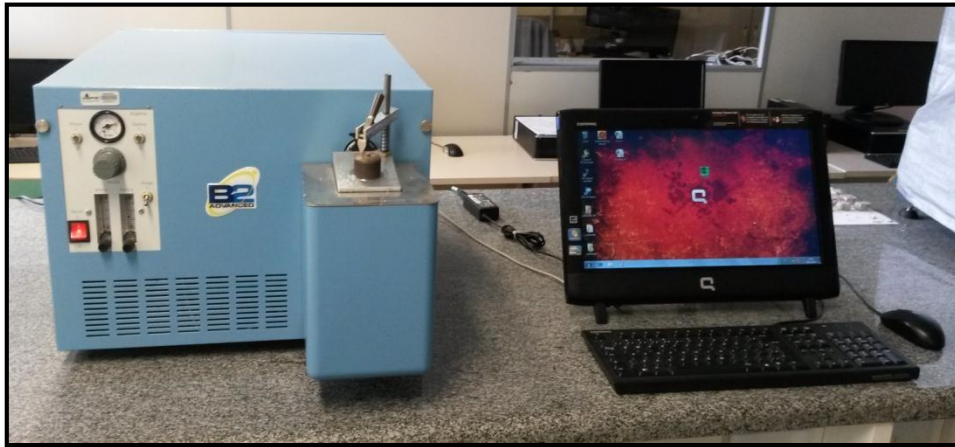


Fonte: Autoria própria.

3.1 Materiais

A Espectrometria de emissão óptica foi utilizada para análise elementar precisa do metal do substrato, aço AISI 1020, recebido pela empresa Rijeza. O espectrômetro utilizado pertence ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa, da marca Anacom Científica, modelo B2 Advanced, que está apresentado na Figura 26.

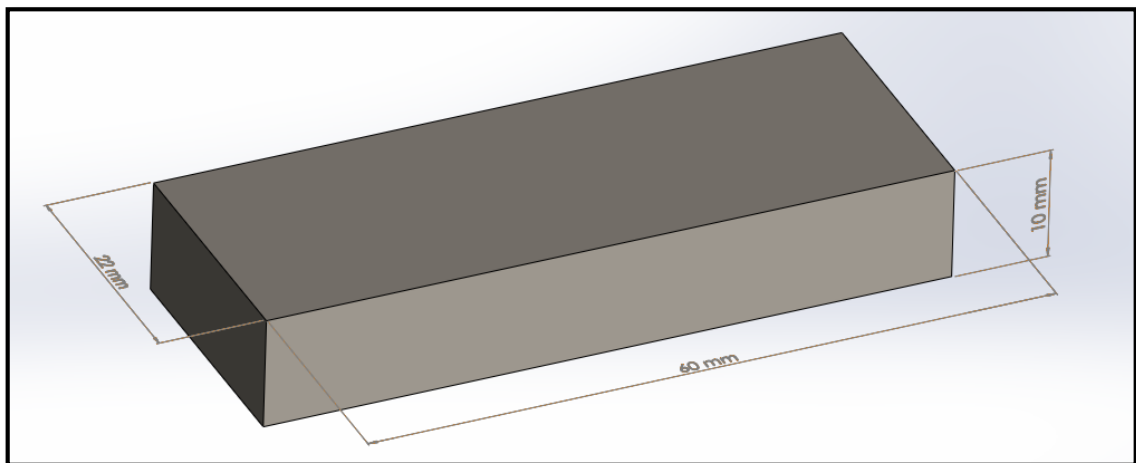
Figura 26 - Espectrômetro de emissão óptica.



Fonte: Autoria própria.

O revestimento de WC foi aspergido pelo método HVOF, as amostras foram fornecidas pela empresa Rijeza com formato retangular cujas dimensões são 60 mm X 22 mm X 10 mm como ilustra a Figura 27.

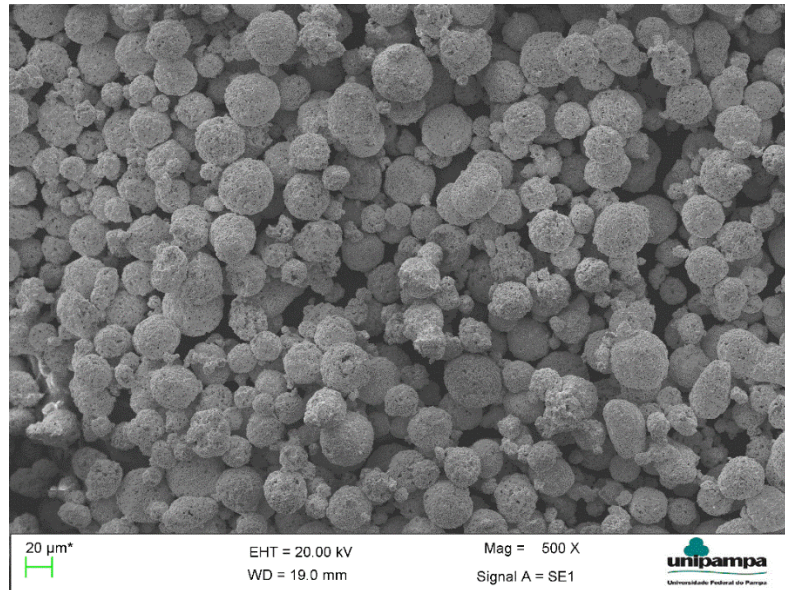
Figura 27 - Imagem ilustrativa das dimensões do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

Para análise de alta resolução microestrutural do pó de Carbetto de tungstênio assim como determinação do tamanho de partícula do pó, foi utilizado o MEV, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, modelo EVO MA10 da Marca Zeiss. A Figura 28 mostra o pó de WC utilizado.

Figura 28 - Pó de Carbetto de Tungstênio utilizado ampliado 500X.

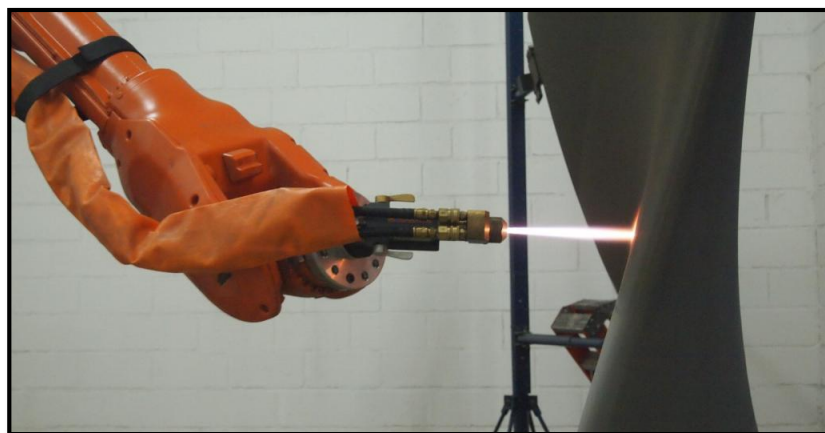


Fonte: Autoria própria.

3.2 Aspersão térmica HVOF do revestimento de Carbetto de Tungstênio

A preparação superficial dos corpos de prova consistiu simplesmente no jateamento abrasivo por granalha de Al_2O_3 eletrofundida de grão 120, para remoção da carepa de laminação e resíduos de óleo da superfície tendo como rugosidade final $Ra\ 5\ \mu m$. Para aplicação do revestimento de carbeto de tungstênio por aspersão térmica HVOF utilizou-se um equipamento de aspersão Praxair-TAFA JP-5000 HP/HVOF movido por um braço robótico, como ilustra a Figura 29 um equipamento semelhante da empresa, e funil alimentador Praxair Modelo 1270.

Figura 29 - Braço robótico para aplicação do método HVOF.



Fonte: Página do site da Rijeza¹.

3.3 Tratamento a laser de CO₂ do revestimento

No processo a laser a fonte de energia que promove o aquecimento é a radiação incidente à superfície da amostra. Parte da radiação é absorvida na superfície do substrato e esta é a responsável pelo aquecimento. O aumento da temperatura é extremamente rápido até a faixa de austenitização, em decorrência da concentração de energia em finas camadas. O resfriamento, graças às camadas frias vizinhas, também ocorre rapidamente, produzindo o efeito de têmpera na zona afetada pelo calor, sem a necessidade de utilizar um líquido de resfriamento.

Após a aspersão do pó de Carbetto de Tungstênio (WC), as amostras foram irradiadas por um feixe de laser de CO₂, com potência de saída de 125 W, comprimento de onda de 10,6 μm e distribuição Gaussiana de energia. O equipamento utilizado é da marca *SYNRAD*, modelo *Evolution 125*, pertencente ao Laboratório de Desenvolvimento de Aplicação de ÓTICA e Lasers – DEDALO IEAv (Instituto de Estudos Avançados)/DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial) da cidade de São José dos Campos – SP, conforme apresenta a Figura 30.

Figura 30 - Laser de CO₂. Na caixa retangular localizam-se os espelhos galvanométricos que guiam o feixe na superfície da amostra.



Fonte: Autoria própria.

O objetivo do tratamento com laser é gerar uma ligação metalúrgica entre o substrato metálico e o ligante, que além de aumentar a aderência do ligante ao substrato, promoverá

gradual mudança de coeficiente de dilatação térmica na interface metal/WC, prevenindo o surgimento de falhas no revestimento por destacamento.

Caso a camada do revestimento seja pouco espessa ou contenha falhas que exponham o substrato, novas aspersões e irradiações a laser serão realizadas, até que obtenha seu completo recobrimento. Para a seleção dos parâmetros do laser foi necessária à elaboração de uma carta de processos, contendo parâmetros do sentido de varredura, velocidade de varredura, densidade de potência e taxa de sobreposição (resolução), como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3. Algumas das amostras não foram irradiadas com o feixe de laser 3 vezes consecutivas, como mostram as tabelas, para obter diferentes parâmetros.

Tabela 2 - Carta de processos Laser Contínuo.

1ª Irradiação				
Parâmetros	Sentido de varredura	Velocidade de varredura (mm/s)	Potência (%)	Resolução
1	Horizontal	100	50	300
2				
3				
4				
5				
6				
2ª Irradiação				
Parâmetros	Sentido de varredura	Velocidade de varredura (mm/s)	Potência (%)	Resolução
1	Vertical	50	100	300
2	Horizontal			
3	Vertical			
4	Horizontal			127
5	Horizontal			
6	Horizontal			
3ª Irradiação				
Parâmetros	Sentido de varredura	Velocidade de varredura (mm/s)	Potência (%)	Resolução
1				
2				
3				
4				
5	Horizontal	200	100	127
6	Vertical	400		

Fonte: Autoria própria.

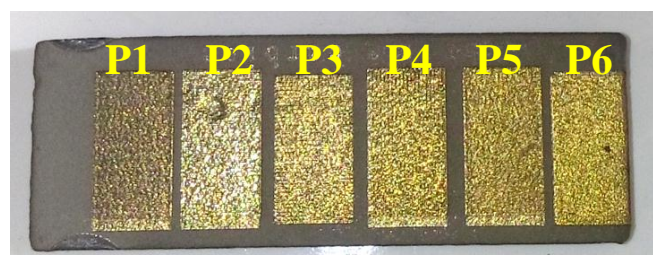
Tabela 3 - Carta de processos Laser Pulsado (*SPOT*) com Potência de 100%.

1ª Irradiação			
Parâmetros	Sentido de varredura	<i>Spot mark duration</i> (ms)	Resolução
1	Horizontal	10	300
2	Vertical		
3	Horizontal		
4	Vertical		
5			
6			
2ª Irradiação			
Parâmetros	Sentido de varredura	<i>Spot mark duration</i> (ms)	Resolução
1	Vertical	25	127
2		10	300
3		25	127
4		10	300
5		10	127
6	Horizontal	45	127
3ª Irradiação			
Parâmetros	Sentido de varredura	<i>Spot mark duration</i> (ms)	Resolução
1			
2			
3	Horizontal	10	300
4	Vertical		
5			
6			

Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 ilustra um corpo de prova, com dimensões iguais a amostra da Figura 27, irradiado com o feixe de laser para análise, juntamente com os seus parâmetros descritos na carta de processo.

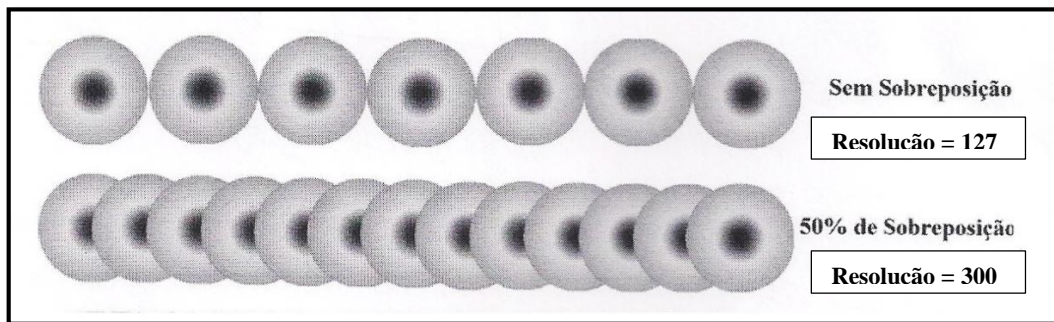
Figura 31 - Amostra com os seis parâmetro irradiados pelo laser.



Fonte: Autoria própria.

O fator de sobreposição do feixe de laser é um parâmetro muito importante pois com altos valores de sobreposição (maiores que 70%) a distribuição de intensidade na irradiação com feixe de laser de distribuição gaussiana pode levar a um efeito de distribuição contínua no laser de CO₂. A Figura 32 apresenta um esquema do fator de sobreposição de um feixe de laser. Quando não há fator de sobreposição, é usado uma resolução de magnitude 127 e quando o fator de sobreposição está em 50% é usado uma resolução de magnitude 300 (para o equipamento de laser utilizado) como consta na carta de processos.

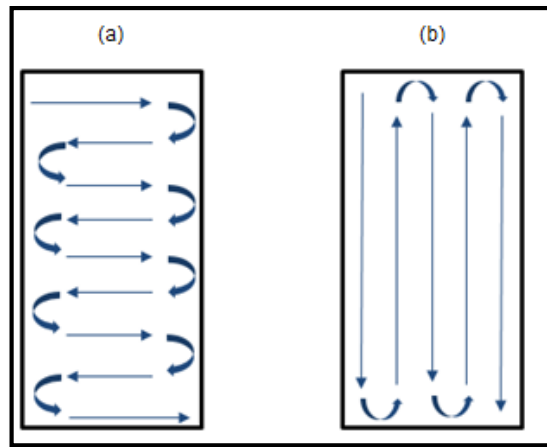
Figura 32 - Fator de sobreposição.



Fonte: Notas de aula de Claudio Santos (2016).

O sentido de varredura do feixe de laser influencia na taxa de resfriamento do material. 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 pouco mais de tempo para irradiar a superfície posterior ao passe. Os sentidos de varredura da irradiação do feixe de laser de CO₂ pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Sentido de varredura do feixe de laser nas amostras: (a) sentido horizontal e (b) sentido vertical.



Fonte: Autoria própria.

Neste trabalho, busca-se a otimização do tratamento com a variação dos parâmetros do laser (potência, frequência de repetição, energia de pulso), do dispositivo de movimentação das peças (velocidade e taxa de sobreposição do feixe de laser), número de aplicações, características do material particulado (espessura da camada, distribuição de tamanho das partículas, etc.). Para cada condição de ensaio fez-se necessária à medição das alterações provocadas pelo laser na superfície e a sua influência nas propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Isto normalmente é realizado com técnicas que envolvem preparações metalográficas, para que se possam verificar as alterações na estrutura do material, através de medições de microdureza, avaliação por microscopia ótica e eletrônica de varredura.

3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para análises de alta resolução microestrutural das amostras revestidas com WC e posteriormente irradiadas com laser de CO₂, foi utilizado o MEV, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, modelo EVO MA10 da Marca Zeiss, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autoria própria.

3.5 Metalografia

O ensaio metalográfico foi realizado no laboratório de Química e Metalografia da Unipampa onde contém os equipamentos necessários para o corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e micrografia.

Foi necessário, para realização da microdureza, embutir o corpo de prova em baquelite através da embutidora digital da marca Fortel, modelo 30, que utiliza uma pressão de trabalho de 1000 lbf/pol², como mostra a Figura 35. Depois disso, o corpo de prova embutido foi lixado com as lixas de 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 grãos/pol², rotacionando em 90° a amostra entre cada troca de lixa, até obter uma superfície espelhada. Para realização do ataque químico foi utilizado o reagente Kalling cuja composição foi 3g CuCl₂, 5ml HCl, 50ml Etanol.

Figura 35 - Embutidora digital.



Fonte: Autoria própria.

Para realização das amostras para o teste de desgaste foi utilizada a cortadora de precisão da marca Buehler, modelo IsoMet 4000, como mostra a Figura 36. As amostras foram cortadas com comprimento e largura de 12,7 mm para encaixe no suporte da máquina de desgaste.

Figura 36 - Cortadora de precisão.



Fonte: Autoria própria.

3.6 Microdureza

O microdurômetro que foi utilizado é pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa, da marca Buehler, modelo MicroMet 6010, que está apresentado na Figura 37. Foi utilizada uma carga de 100 g para ser possível realizar quatro indentações no revestimento quanto no substrato, para assim, ser possível mensurar a microdureza ao longo do revestimento.

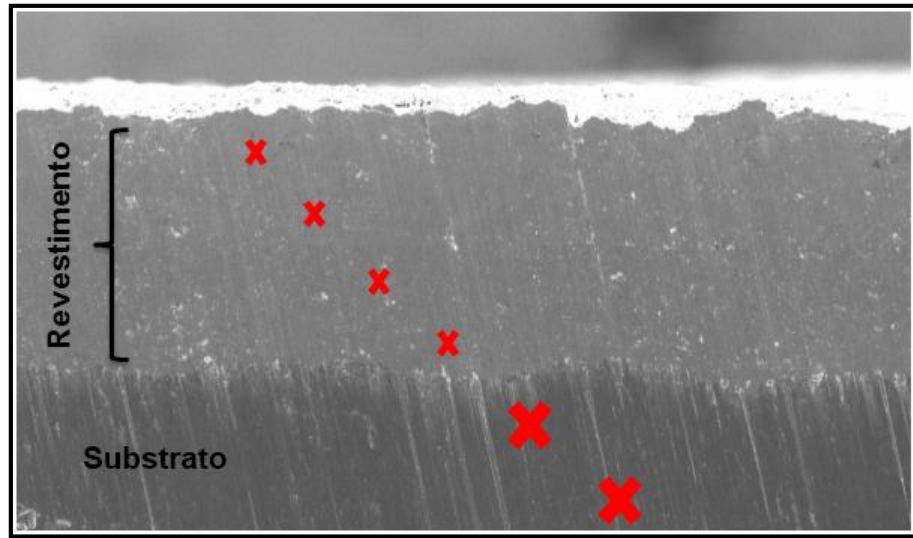
Figura 37 - Microdurômetro.



Fonte: Autoria própria.

As indentações distanciaram entre si numa medida de três vezes o diâmetro da indentação. As indentações realizadas estão representadas pelo símbolo “x” e foram realizadas na direção diagonal a superfície como mostra a Figura 38. O diâmetro das indentações no revestimento foram menores devido sua alta microdureza e o diâmetro das indentações sobre o substrato maiores, devido sua menor microdureza.

Figura 38 - Orientação das indentações.



Fonte: Autoria própria.

3.7 Desgaste

Para realização do ensaio de desgaste foi utilizado o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Unipampa. A Figura 39 mostra o equipamento empregado.

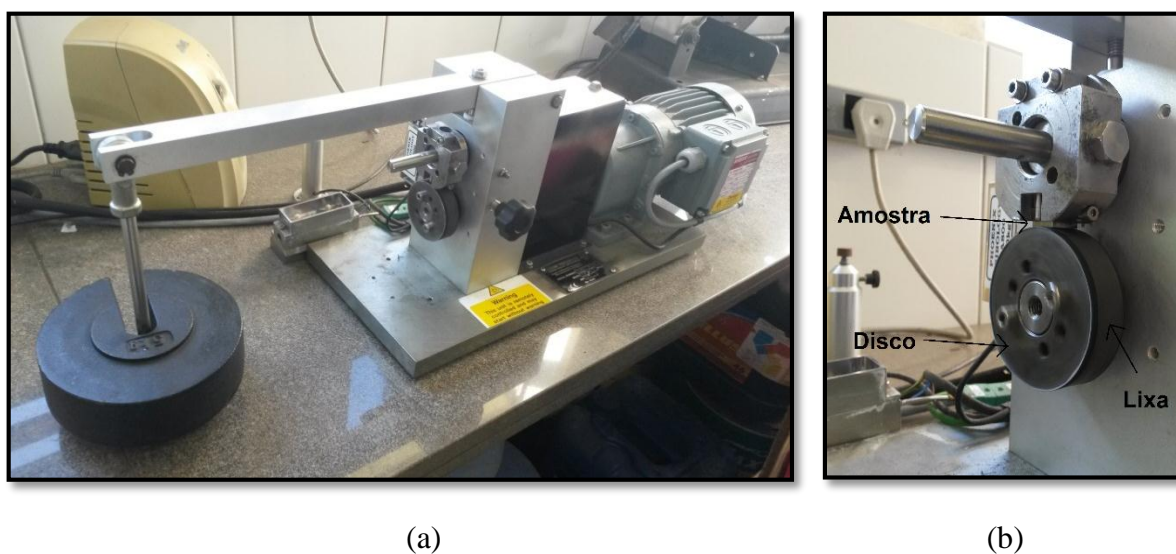
Figura 39 - Equipamento para ensaio de desgaste.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 apresenta uma foto do modelo do equipamento montado para os ensaios de desgaste (a) e a amostra inserida no suporte em contato com o disco de desgaste com lixa (b).

Figura 40 - Equipamento de desgaste montado (a) e amostra inserida para o teste (b).



Fonte: Autoria própria.

Após a realização de testes preliminares, com cargas aplicadas de 1 kg, 2 kg, 3 kg e 5 kg, lixas de granulometria de 50, 80, 120 e 150 grãos/pol² coladas com cola instantânea sobre o disco e números de ciclos com 100, 200, 300, 400, 500 e 650 revoluções, foi possível definir um parâmetro de funcionamento da máquina para que se obtivesse um desgaste mensurável para todos os tipos de amostras.

Os parâmetros utilizados para o funcionamento da máquina foram:

- ❖ Diâmetro do disco de desgaste de 60 mm;
- ❖ Velocidade de 50 rpm (0,15 m/s);
- ❖ Carga aplicada de 5 kg convertida em 287 N pela máquina;
- ❖ Lixa d'água de 120 grãos/pol²;
- ❖ Número de ciclos de 650;
- ❖ Troca por lixa nova a cada 200 revoluções.

Para medir a massa perdida no ensaio de desgaste foi utilizada uma balança de precisão com resolução de 0,001g, da marca Shimadzu modelo AY220, como mostra a Figura 41, cuja finalidade é mensurar a massa das amostras limpas antes e depois do teste e através desta diferença, calcular a perda de massa pela equação 1.

$$\text{Perda de massa} = m_i - m_o \quad \dots(1)$$

Onde m_i é a massa inicial e m_o é a massa final da amostra.

Figura 41 - Balança de precisão.



Fonte: Autoria própria.

A variação de massa pode ser convertida em perda de volume através da densidade do material.

3.8 Rugosidade

Para realização do ensaio de rugosidade foi utilizado o rugosímetro digital portátil da marca HOMIS, modelo TR200, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Unipampa. É um produto de altíssima qualidade, desenvolvidos para trabalhos em laboratórios quanto para trabalhos à campo. Para a medição de rugosidade ser feita, o sensor é colocado sobre uma parte da superfície, onde ele traça um percurso em uma taxa constante.

Depois dos dados serem processados, são enviados para o display ou podem ser impressos através da interface de comunicação RS232. A Figura 42 apresenta uma foto do equipamento utilizado.

Figura 42 - Rugosímetro.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise óptica, da MEV, microdureza, desgaste e rugosidade das amostras conforme o descrito no Capítulo 3.

4.1 Análise Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras

Para determinação dos elementos químicos constituintes no substrato da amostra revestida com WC por HVOF foi realizada a espectrometria de emissão óptica. A Tabela 4 apresenta os resultados.

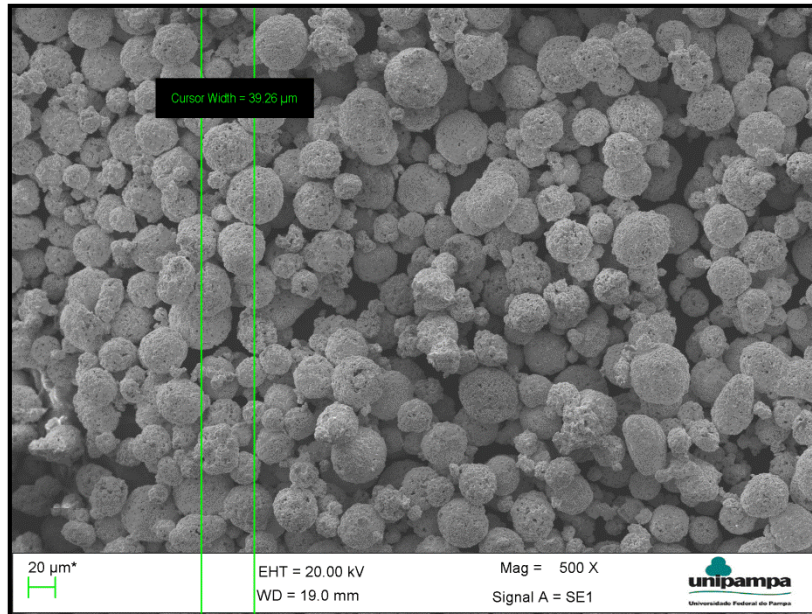
Tabela 4 - Composição química do aço da amostra da empresa Rijeza.

Composição química do aço									
Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	W	P	Pb
% massa	0,1956	0,0231	0,7520	0,0119	0,0087	0,0123	0,2201	0,0069	0,1328

Fonte: Autoria própria.

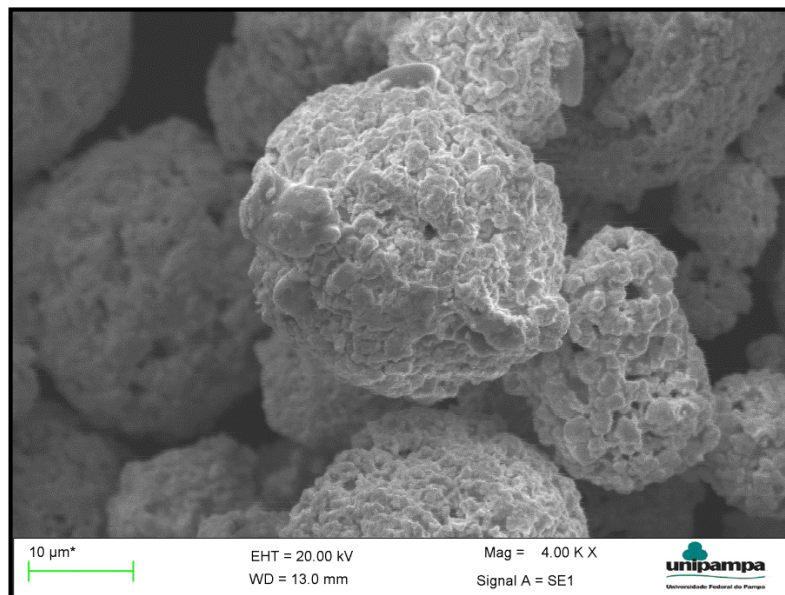
A Figura 43 mostra a imagem feita em MEV do pó de WC, disponibilizado pela empresa Rijeza, ampliada com magnitude de 500X para realizar a medição do diâmetro de um elemento constituinte do pó utilizado no revestimento. Obteve-se um diâmetro de 39,36 μm para um dos elementos. Para melhor visualização da partícula do pó, a Figura 44 apresenta uma ampliação de 4000X em uma das partículas.

Figura 43 - Imagem do pó de WC ampliada 500 X.



Fonte: Autoria própria.

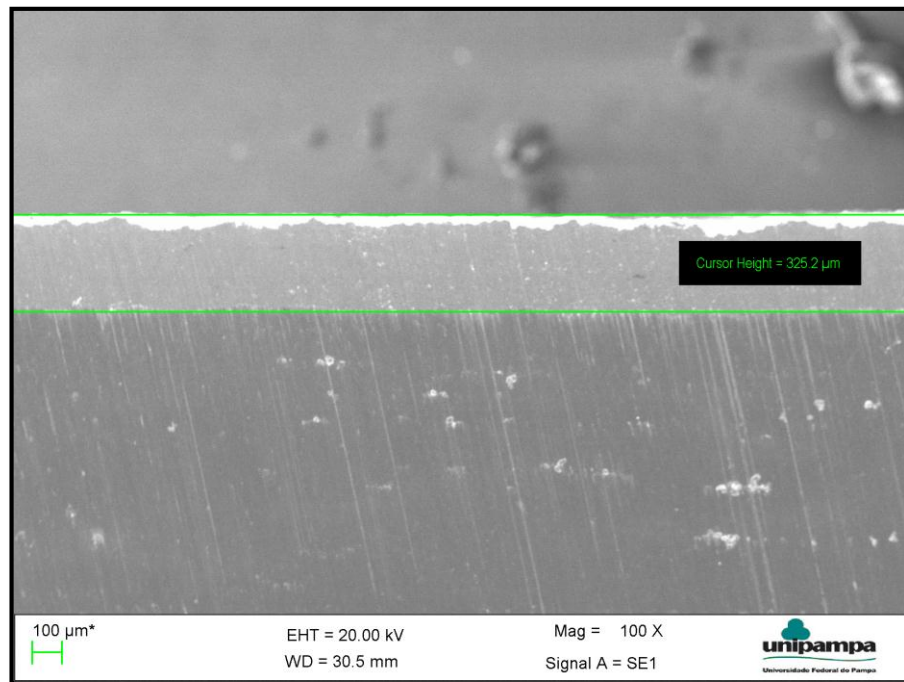
Figura 44 - Imagem do pó de WC ampliada 4000 X.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 apresenta a análise feita em MEV para determinação da espessura do revestimento de WC aspergido pelo método HVOF. Obteve-se uma espessura de 325,2 μm em uma ampliação de 100X.

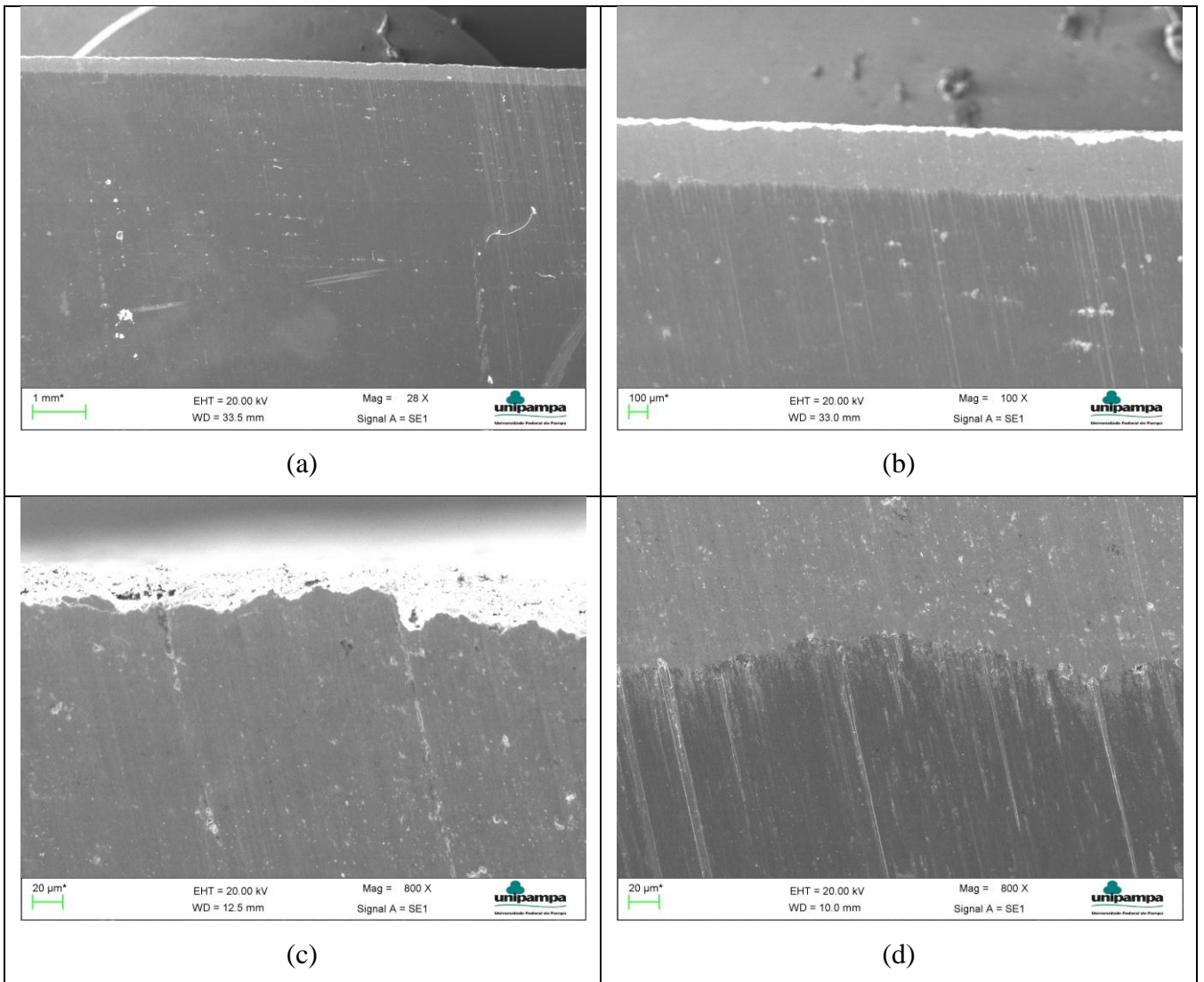
Figura 45 - Espessura do revestimento por MEV.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 46 apresenta a análise do revestimento com diferentes ampliações para analisar a interface, o revestimento e o substrato. Pode-se perceber que de acordo com as imagens da Figura 46 (a), (b) e (c) o revestimento se mantém homogêneo, sem trincas e porosidade muito baixa. Para a imagem (d) da mesma figura, percebe-se que o revestimento apresenta uma ótima adesão ao substrato de aço AISI 1020 sem a presença de trincas e imperfeições nesta interface e no próprio revestimento. A presença de riscos nas imagens se deve ao fato das amostras serem cortadas com o disco de corte passando primeiramente pelo revestimento e assim causando essas ranhuras no substrato.

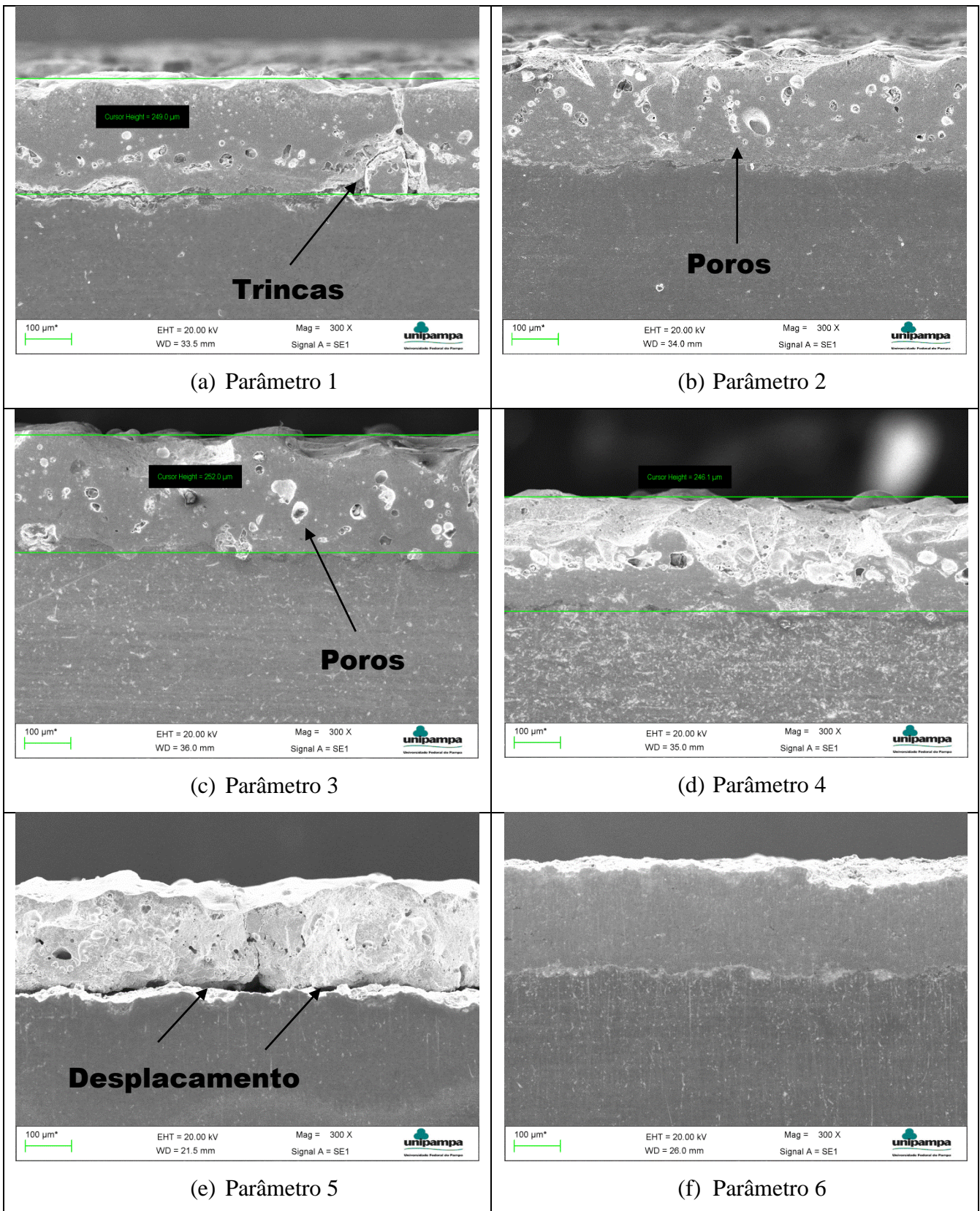
Figura 46 - Imagens do revestimento de WC com ampliações de 28X (a), 100X (b), 800X (c) e 800X (d).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 47 apresenta a análise do revestimento com tratamento de laser de CO₂ Contínuo feitas no MEV com diferentes ampliações para analisar o revestimento e interface entre revestimento e substrato. Pode-se perceber que as imagens (a) e (e) apresentam descolamento, trincas e imperfeições tanto na interface entre o revestimento e o substrato quanto no revestimento devido aos parâmetros utilizados para esses casos. As imagens (b), (c) e (d) apresentam poros e vazios no revestimento, porém essas apresentam boa adesão ao substrato. Por fim, a imagem (f) ilustra o parâmetro 6, o qual apresenta baixo índice de porosidade, boa adesão ao substrato e um revestimento homogêneo em sua totalidade.

Figura 47 - Imagens do revestimento de WC com tratamento a Laser Contínuo de CO₂ para os Parâmetros de 1 a 6.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 48 apresenta a análise do revestimento com tratamento de laser de CO₂ Pulsado, com diferentes ampliações para analisar o revestimento e a interface. Pode-se perceber que as imagens (b), (c) e (d) dessa figura apresentam trincas superficiais no revestimento e micro trincas e poros mais próximos do substrato representando uma má fusão do laser nessa região. As imagens (a), (e) e (f) mostram que os parâmetro utilizados conseguiram refundir o revestimento de modo a diminuir a presença trincas no revestimento em comparação aos outros parâmetros, mas apresentam alguns poros principalmente na superfície da imagem (f). Comparado ao laser contínuo o laser pulsado apresentou uma melhor ancoragem entre o revestimento e o substrato.

Figura 48 - Imagens do revestimento de WC com tratamento a Laser Pulsado de CO₂ para os Parâmetros de 1 a 6.

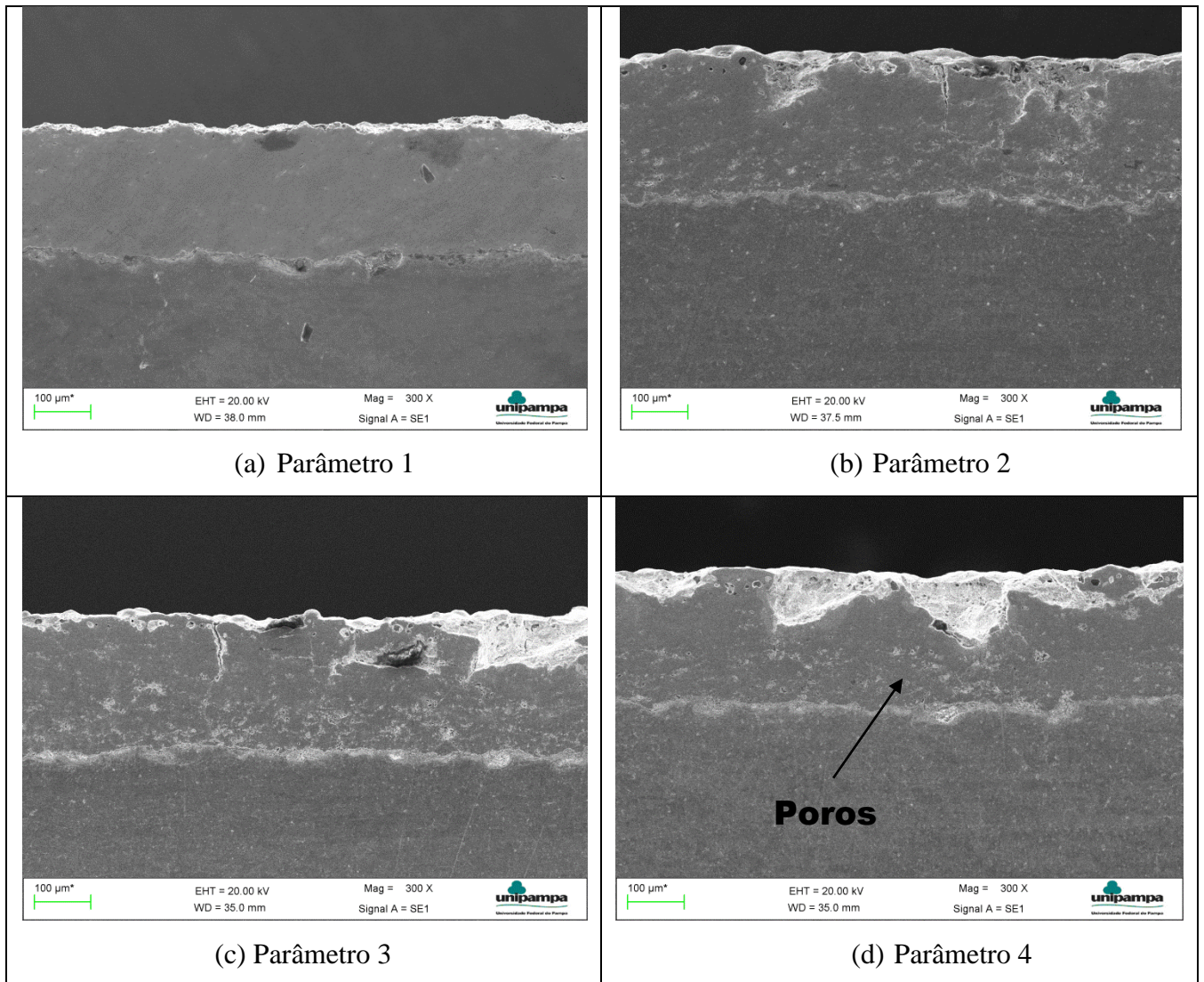
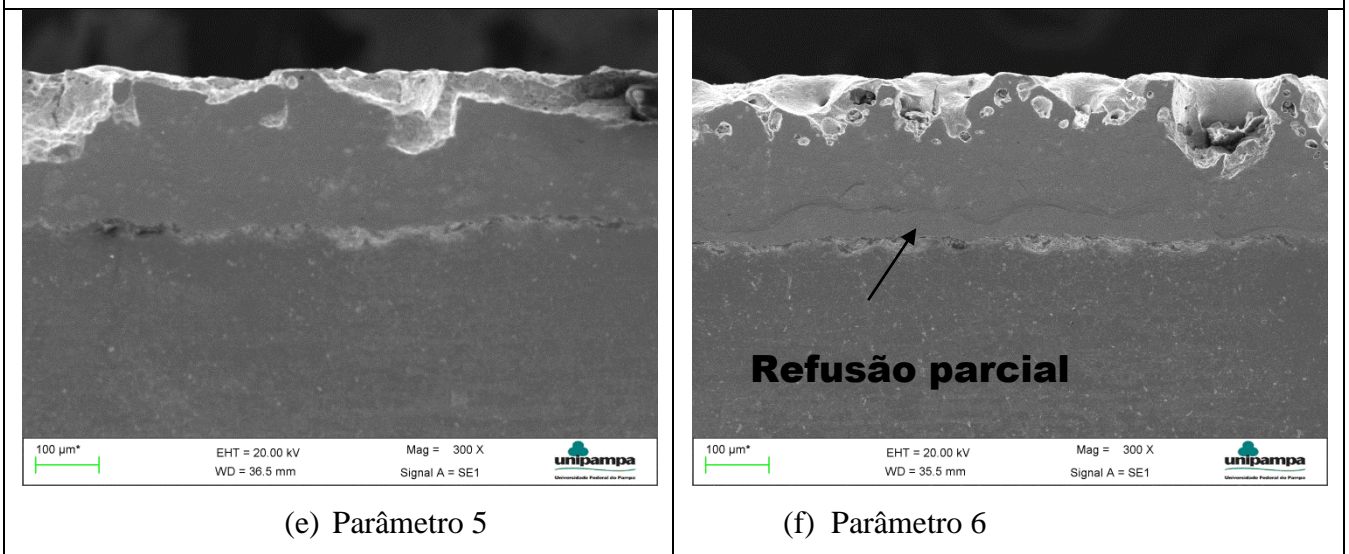


Figura 48 – (continuação)

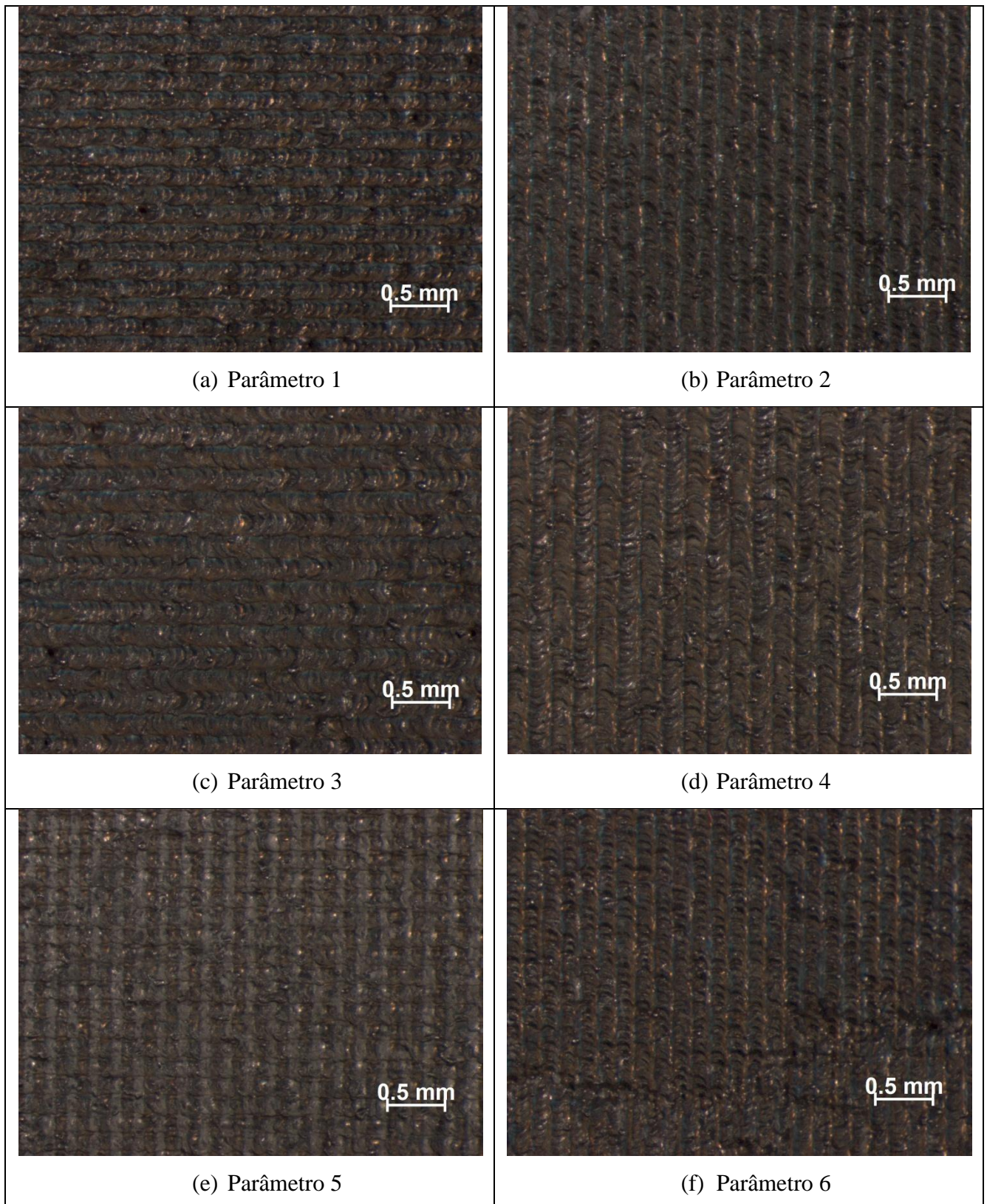


Fonte: Autoria própria.

Após a análise no MEV, foi escolhido o Parâmetro 1 de Laser Pulsado de CO₂ para realização dos testes de desgaste, microdureza e rugosidade. Este parâmetro é o que melhor apresenta um revestimento sólido, homogêneo, com poucas trincas e uma boa ancoragem no substrato.

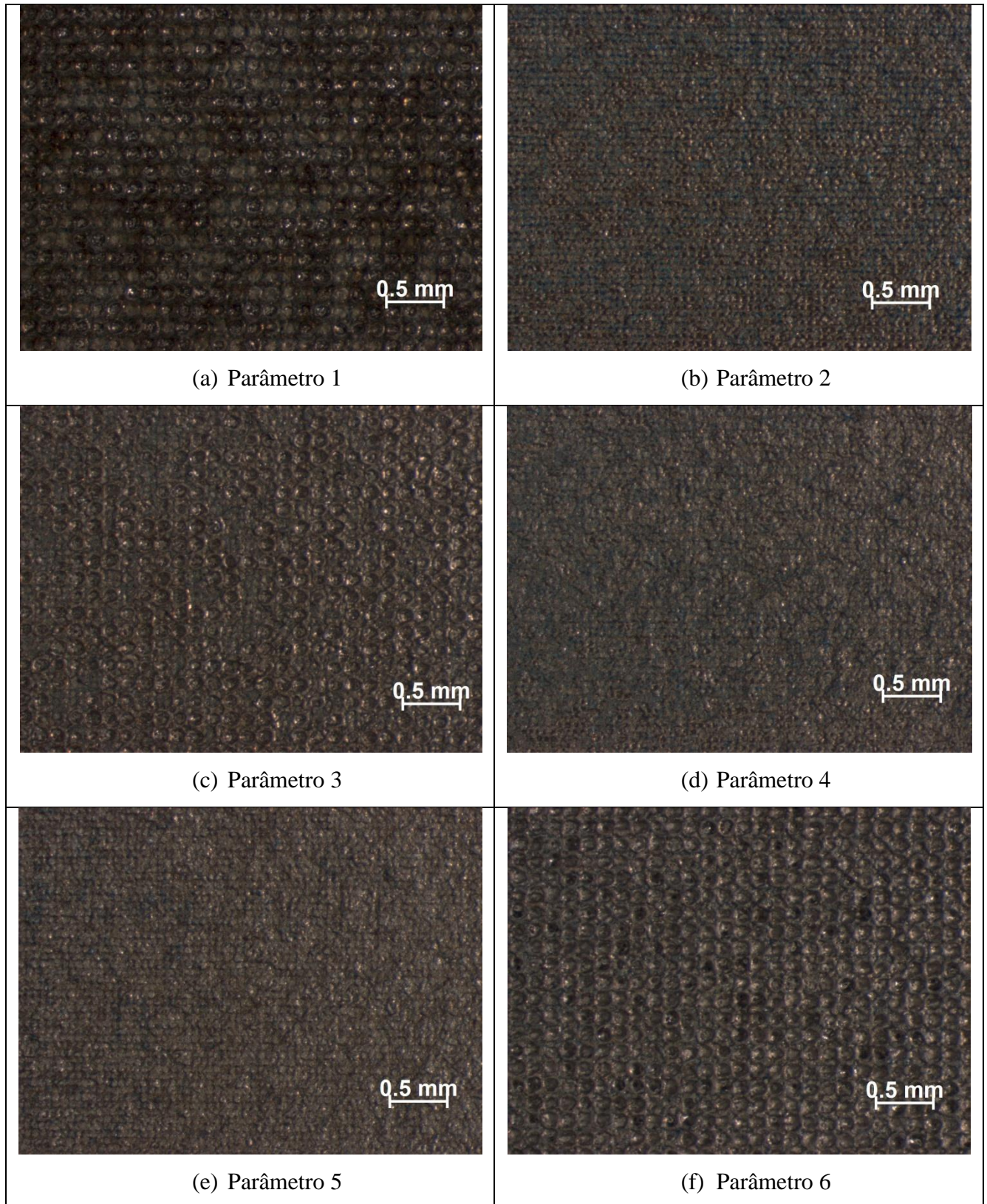
Fazendo uma análise óptica da superfície irradiada das amostras, a Figura 49 mostra em (a), (b), (c), (d), (e) e (f) a caracterização do revestimento após a irradiação do laser contínuo nos seis diferentes parâmetros. O mesmo é feito para a Figura 50, porém com o tratamento de laser pulsado. Ambas as figuras conseguem retratar bem a distinção da maneira com a qual o laser imprime no revestimento sua ação de tratamento.

Figura 49 - Análise óptica Laser Contínuo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 50 - Análise óptica Laser Pulsado.

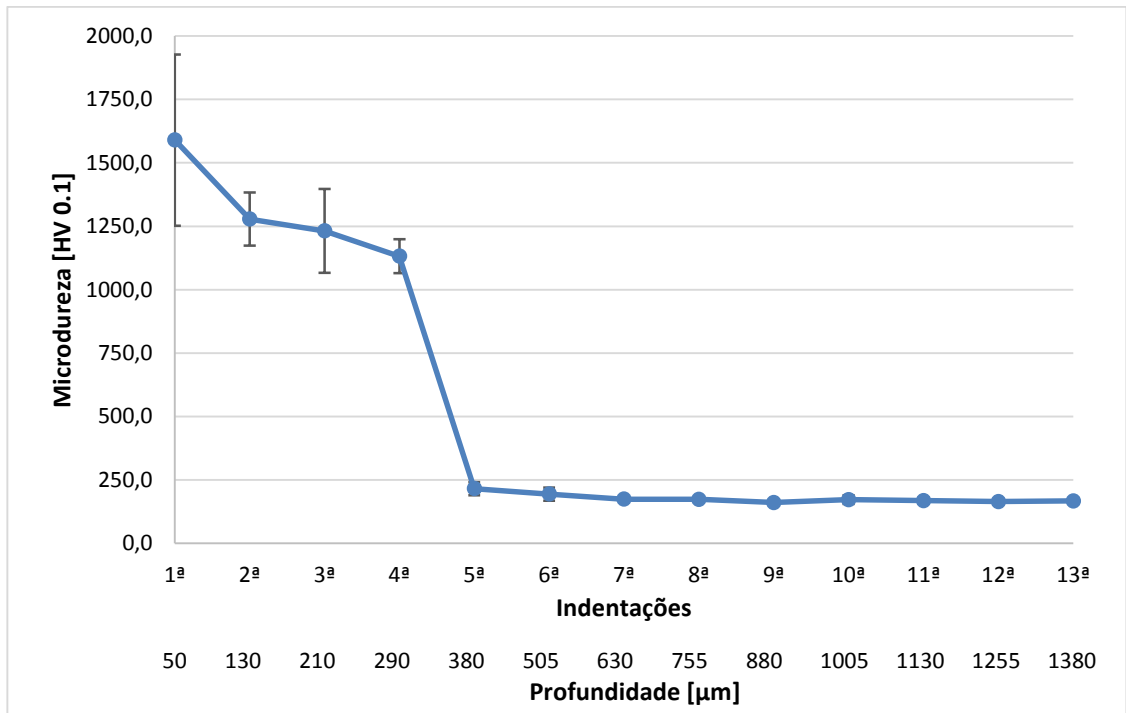


Fonte: Autoria própria.

4.2 Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado na escala Vickers (HV) com uma carga de 0,1 kg. As indentações distanciaram entre si em três vezes o diâmetro da indentação realizada na direção diagonal à superfície. Foi possível obter quatro indentações no revestimento aspergido de WC e nove indentações no substrato. Esse procedimento foi realizado quatro vezes e assim foi feita uma média das indentações juntamente com seu desvio padrão como mostra a Figura 51.

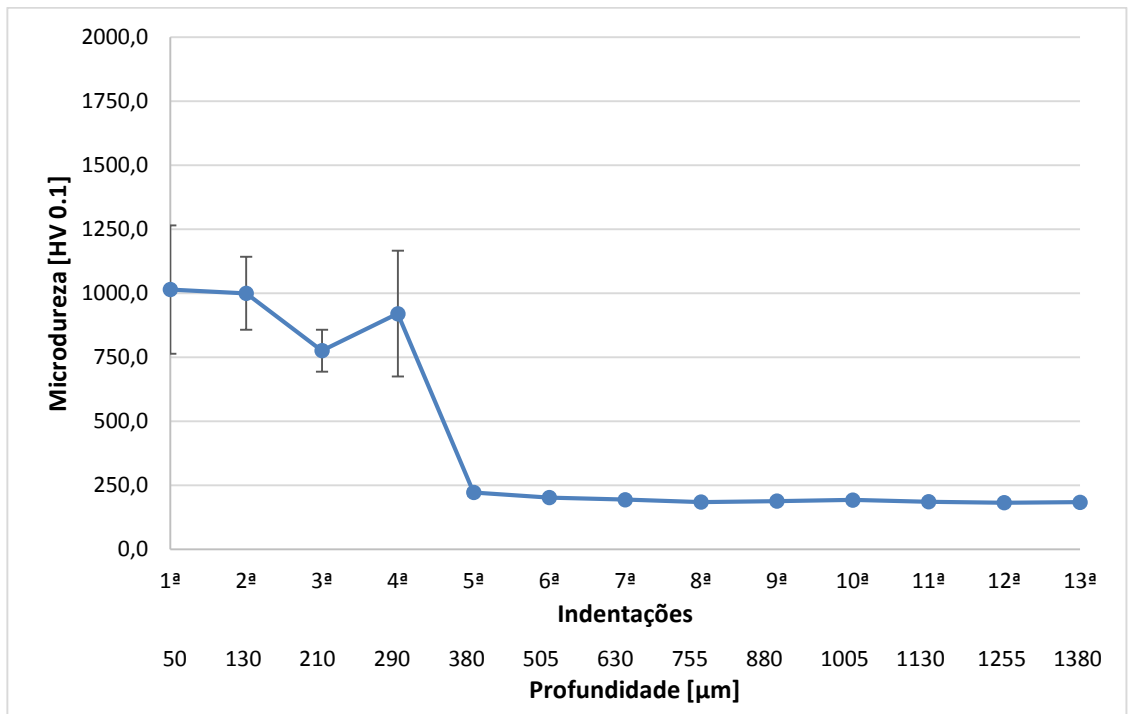
Figura 51 - Média das microdurezas com HVOF de WC.



Fonte: Autoria própria.

O mesmo procedimento foi realizado para a amostra irradiada com Laser Contínuo com o Parâmetro 2 como mostra a Figura 52.

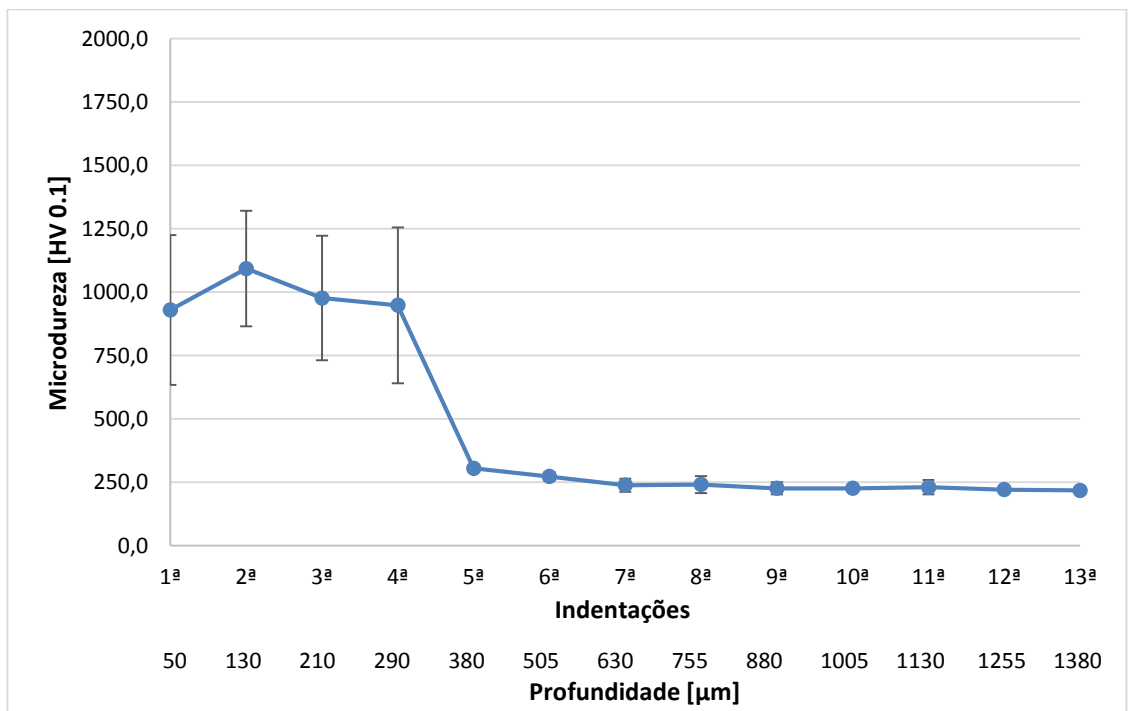
Figura 52 - Média das microdurezas com Laser Contínuo P2.



Fonte: Autoria própria.

O mesmo procedimento foi feito também para a amostra irradiada com Laser Pulsado com o Parâmetro 1 como mostra a Figura 53.

Figura 53 - Média das microdurezas com Laser Pulsado P1.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que a amostra revestida com WC sem a irradiação do laser, Figura 51, apresentou uma microdureza superior as demais, obtendo uma média de dureza próxima a 1560 HV com desvio padrão amostral de 337 para a primeira indentação. Na segunda, terceira e quarta indentação, ainda sobre o revestimento, a média ficou entre 1238 HV e 1131HV com desvio padrão menor. Para as nove restantes indentações sobre o substrato de aço 1020 a microdureza se manteve abaixo dos 250 HV.

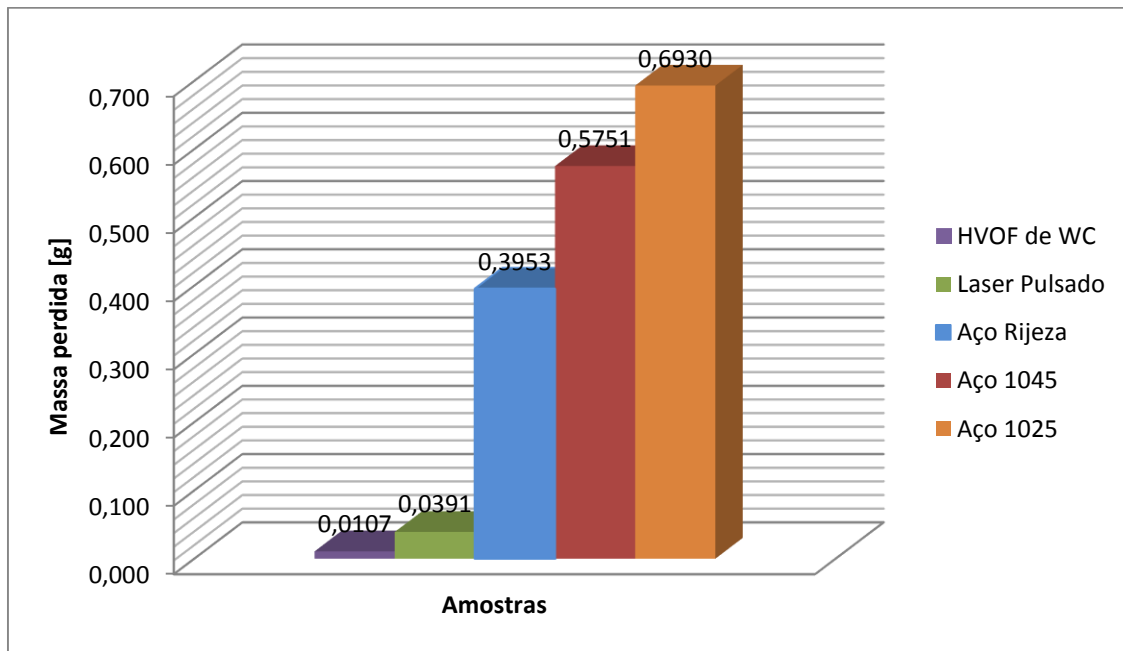
Para a amostra revestida com WC irradiada com Laser Contínuo, Figura 52, cujo parâmetro escolhido foi o parâmetro 2, a primeira, segunda e quarta indentação manteve-se com uma microdureza próxima a 1000 HV e desvio padrão semelhantes, porém, a terceira indentação mostra um menor valor de microdureza, 776 HV, que pode caracterizar uma região possivelmente enfraquecida pela refusão entre o meio e a interface entre revestimento e substrato pelo tratamento a laser. As demais indentações no substrato mantiveram-se abaixo dos 250 HV.

Por fim, a amostra revestida com WC irradiada com Laser Pulsado, Figura 53, cujo parâmetro escolhido foi o parâmetro 1 da carta de processos, mostrou que os valores de microdureza sobre o revestimento mantiveram-se em torno de 1000 HV. Diferentemente do caso anterior, a segunda indentação passa a apresentar uma microdureza relativamente superior as demais sobre o revestimento, podendo ser caracterizada pelo processo de resfriamento da refusão do laser pulsado. As demais indentações também mantiveram-se abaixo de 250 HV salvo as indentações 5 e 6 que podem ter sofrido os efeitos do laser por terem apresentado uma microdureza superior aos 250 HV.

4.3 Ensaio de Desgaste

Foi realizado o ensaio de desgaste bloco sobre anel com amostras de aço AISI 1025 (com composição de 0,27% de carbono) e AISI 1045 disponibilizadas pela UNIPAMPA. Realizou-se também o ensaio com a amostra revestida com WC, amostra revestida com WC irradiada com laser pulsado de CO₂ com parâmetro 1 e amostra de aço AISI 1020 da empresa rizeja cuja composição já foi apresentada. A Figura 54 apresenta os resultados obtidos no teste de desgaste realizado com lixa de 120 grãos/pol², 650 ciclos, velocidade de 50rpm e carga de 5 kg como mencionado no Capítulo 3.

Figura 54 - Resultados do teste de desgaste por perda de massa.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que a amostra de aço 1025, teve a maior perda de massa em relação as demais amostras ensaiadas e a amostra aspergida com HVOF e revestida com WC obteve a menor perda de massa. É possível perceber que a diferença da perda de massa da amostra de aço 1025 foi de:

- ✓ 1,2 vezes maior em relação ao aço 1045;
- ✓ 1,7 vezes maior em relação ao aço da empresa Rijeza;
- ✓ 17,7 vezes maior em relação a amostra revestida com Carbetto de tungstênio e irradiada com Laser Pulsado de CO₂;
- ✓ 64,7 vezes maior em relação a amostra revestida com Carbetto de tungstênio.

O aço 1020 fornecido pela empresa Rijeza se mostrou mais resistente ao aço AISI 1025 fornecido e analisado pela Unipampa, logo, essa diferença pode ter vindo a ocorrer devido ao aço fornecido pela empresa apresentar em sua composição elementos de tungstênio e manganês cujas características é de serem materiais duros.

Comparando apenas as amostras revestidas com Carbetto de tungstênio e revestida com Carbetto de tungstênio com a irradiação do laser é possível perceber que houve uma perda de massa de 3,65 vezes menor na amostra sem a irradiação por laser. Logo, é possível reconhecer que ambas mostraram-se mais resistentes ao desgaste comparado às demais amostras.

Entretanto, a diminuição da microdureza na amostra irradiada por laser pode ter sido o fator determinante para a elevação da perda de massa nesse ensaio.

4.4 Rugosidade

A Tabela 5 mostra os resultados do teste de rugosidade para as amostras tratadas com HVOF e Laser Pulsado. O teste feito com a amostra com laser pulsado foi realizado com o parâmetro 1.

É importante salientar a importância de ter uma peça com baixa rugosidade, pois, o equipamento em estudo tem que dispor de uma superfície pouco rugosa para o grão de arroz deslizar e não vir a travar o fluxo de arroz dentro do equipamento, além de não ter o grave problema de descascar o grão.

Tabela 5 – Resultados do teste de rugosidade.

Rugosidade WC		
	HVOF	Laser Pulsado - P1
Medições	Ra [μm]	Ra [μm]
1 ^a	5.233	5.736
2 ^a	4.415	6.190
3 ^a	4.114	6.425
4 ^a	3.786	5.941
5 ^a	4.831	5.825
Média	4.476	6.023

Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que a amostra apenas revestida com WC apresentou uma rugosidade média Ra menor que a amostra irradiada com laser pulsado. Vale salientar que esse problema pode ser corrigido com um polimento superficial do revestimento caso essa rugosidade faça com que os grãos de arroz venham a descascar durante o processo da colheita, porém, esse artifício levaria a um custo superior.

4.5 Análise de custo preliminar

Como visto anteriormente no Capítulo 2, o elevador da retilha apresenta uma largura interna de aproximadamente 12 cm e um comprimento com cerca de 2,60 m, já o elevador de grão apresenta uma largura interna de 16 cm e um comprimento de 3,60 m. Foi feito então,

uma pesquisa do valor por metro quadrado da utilização da máquina de aspersão térmica de HVOF de R\$ 12.000,00 para possível aplicação na colheitadeira em estudo. Diante disso, tem-se para o elevador de retilha uma área de 0,312 m², apenas na superfície onde ocorre o desgaste como mostra as Figuras 3 e 4, e para o elevador do grão uma área de 0,576 m², apenas na superfície onde ocorre o desgaste como mostra a Figura 5.

Com isso obteve-se um valor de R\$ 3.744,00 e R\$ 6.912,00 para aplicação do revestimento de WC para o elevador de retilha e grão respectivamente, totalizando um custo de R\$ 10.656,00, o qual representa 1,33% do valor total de uma colheitadeira nova no valor de R\$ 800.000,00. Comparando com o valor de R\$ 4782,00 de um elevador original novo de retilha e R\$ 5864,00 um elevador original novo de grão pode-se perceber que a soma desses valores corresponde a R\$ 10.646,00, logo, a diferença dos valores mostra que caso o revestimento de WC resista mais do que duas vezes a mesma condição de serviço, a aplicação do mesmo passa a se tornar mais viável para o produtor rural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste trabalho foram realizados estudos sobre a aplicação do revestimento de WC por aspersão térmica pelo método HVOF e pós-tratamento a laser de CO₂, fazendo análise metalográfica da interface entre recobrimento e substrato, perfil de dureza, porosidade, desgaste e rugosidade do revestimento. Diante disso, o presente estudo permite concluir que:

- A aplicação do revestimento de Carbetto de tungstênio se mostrou densa, sem presença de trincas, com pouca porosidade e uma espessura homogênea de 325,2 µm ao longo de sua extensão, devido à utilização de braço robótico em sua aplicação.

- Com a irradiação por laser de CO₂ sobre o revestimento de WC o mesmo passou a apresentar uma maior porosidade em sua estrutura, como pode ser visto nas imagens feita com o MEV, e alguns dos parâmetros utilizados nas cartas de processos apresentaram deslocamento do revestimento, trincas ou grandes poros. Todavia, foi possível escolher o Parâmetro 1 de laser pulsado, que não apresentou estes defeitos e sim aparentemente uma boa adesão ao substrato.

- No ensaio de microdureza, as amostras revestidas com WC sem a irradiação de laser apresentaram um valor próximo a 1600 HV na primeira indentação, mais próxima da superfície do revestimento, e as três próximas ainda no revestimento em torno de 1250 HV. Foram realizadas indentações no substrato, porém, esse não apresentou alterações na microdureza mantendo-se abaixo dos 250 HV. As amostras revestidas com WC e irradiadas com laser de CO₂ com parâmetro contínuo e pulsado, apresentaram um valor em torno de 1000 HV nas indentações no revestimento. Para o laser contínuo manteve-se um valor também abaixo de 250 HV para as indentações no substrato, entretanto, para o laser pulsado a microdureza elevou-se nas duas seguintes indentações no substrato. Pode-se verificar que a irradiação do laser provoca uma refusão no revestimento aspergido causando uma diminuição na microdureza.

- No ensaio de desgaste, as amostras apresentaram uma perda de massa em relação a amostra de aço 1025 de: 1,2 vezes maior em relação ao aço 1045; 1,7 vezes maior em relação ao aço da empresa Rijeza; 17,7 vezes maior em relação a amostra revestida com Carbetto de tungstênio e irradiada com Laser Pulsado de CO₂ e 64,7 vezes maior em relação a amostra revestida com Carbetto de tungstênio. O aço 1020 fornecido pela empresa Rijeza se mostrou

mais resistente em relação ao aço AISI 1025, fornecido e analisado pela Unipampa. Essa diferença pode ter ocorrido devido ao aço fornecido pela empresa apresentar em sua composição um elevado índice de elementos de tungstênio e manganês, cujas características é de serem materiais duros. As amostras revestidas com Carbetto de tungstênio e as amostras revestidas com WC irradiadas com feixe de laser apresentaram uma perda de massa de 3,65 vezes menor que a amostra sem a irradiação por laser. É possível observar que ambas apresentaram uma discrepância muito maior comparado às demais amostras em relação ao desgaste, todavia, a diminuição da microdureza na amostra irradiada por laser de CO₂ pode ter sido o fator principal para a elevação da perda de massa nesse ensaio.

- O ensaio de rugosidade Ra destaca que a amostra apenas revestida com WC apresenta uma menor rugosidade média em relação a amostra irradiada com o feixe de laser. Ambas podem receber um processo de polimento, se necessário, para apresentarem uma rugosidade menor, encarecendo o processo, para que não ocorra o descascamento do grão de arroz e o travamento do fluxo de arroz dentro do elevador da máquina no momento da colheita do grão.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Utilizar um laser de CO₂ com maior potência para analisar os resultados na estrutura do revestimento;

- ✓ Modificar os parâmetros da carta de processo com laser pulsado para obter um revestimento ainda mais homogêneo e com menos imperfeições;

- ✓ Efetuar um ensaio de desgaste com as amostras em contato direto com o grão de arroz para se ter um resultado de desgaste mais aproximado da realidade.

REFERÊNCIAS

LIMA, C. C; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: fundamentos e aplicações** – 2ª Ed revisada e ampliada. São Paulo: Artliber Editora, (2007).

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings** – 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN (2008).

CASTRO, R. M; CAVALER, L. C. C; KEJELIN, N. Z; COMELI, F. W; ROCHA, A. S. **Revestimento WC depositado por aspersão térmica (HVOF) como alternativa ao cromo duro eletrodepositado aplicados em equipamentos hidráulicos.** *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 19, N.º 2, pp. 27-42, (2015).

SANTOS, J. V; BATISTA, P.B; KIECKOW. F. **Avaliação do desgaste do polietileno UHMW em meio abrasivo de arroz em casca.** 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil (2014).

CHIKARAKARA, E; PUNSET, M; PICAS, J.A; BRABAZON, D; NAHER, S. **Characterisation of Laser Modified WC-CoCr Coatings.** Exposição, 24; 08800 Vilanova i la Geltrú; Espanha (2010).

AFZAL, M; NUSAIR KHAN, A; BEN MAHMUD, T; KHAN, T. I; AJMAL, M. **Effect of laser melting on plasma sprayed WC-12 wt.%Co coatings.** *Surface & Coatings Technology* 266, 22–30 (2015).

SHI HONG ZHANGA; JAE HONG YOONB; MING XI LI; TONG YUL CHOB; YUN KON JOOB; JAE YOUNG CHOB. **Influence of CO2 laser heat treatment on surface properties, electrochemical and tribological performance of HVOF sprayed WC–24%Cr3C2–6%Ni coating.** *Materials Chemistry and Physics* 119, 458–464 (2010).

HENRY HENKE; DIETRICH ADAM; ANDREAS KÖHLER; ROBERT B. HEIMANN. **Development and testing of HVOF-sprayed tungsten carbide coatings applied to moulds for concrete roof tiles.** *Science direct Elsevier, wear* 256 (2004) 81-87.

GANEV, R. A. **Low-power laser hardening of steels**. Journal Of Materials Processing Technology, v121, n2/3, p. 414-419, (2002).

L. A. C. YBARRA; A. L. MOLISANI; D. RODRIGUES; H. N. YOSHIMURA. **Efeitos das características dos pós industriais de tungstênio e carboneto de tungstênio na microestrutura e dureza de metal duro para ferramentas de perfuração de rochas**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.2 (2008) 10-25.

KRISHNA, B. V.; MISRA, V. N.; MUKHERJEE, P. S.; SHARMA, P. **Microstructure and properties of flame sprayed tungsten carbide coatings**. Refractory Metals and Hard Materials, v. 20, p. 355-374. (2002).

UPADHYAYA, G. S. **Materials science of cemented carbides – An overview**. Materials and Design, v. 22, p. 483-489, Elsevier. (2001).

KOLTON, É. P. **Comportamento tribológico do par stellite 6 e colmonoy 56 utilizado em revestimento de mancal de extrusora monorosca**. In: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M. RS (2012). Disponível em <<http://livrozilla.com/doc/327086/000883935>>. Acesso em: 02 jul. 2016.

VITOI, A. A; FRANCO, A. R. J. **Nitretação assistida por plasma do aço inoxidável austenítico AISI 316l sob influência do argônio**. II workshop de ciência e tecnologia em engenharia metalúrgica e de materiais do propemm – IFES, Vitória - ES, 30-31 (2012).

VOORWALD, H. J. C; SOUZA, R. C; PIGATIN, W. L; CIOFFI, M. O. H. **Evaluation of WC–17Co and WC–10Co–4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel**. Surf. Coat. Tech. (2005); 190: 155-64.

VICENZI J, VILLANOVA DL, LIME MD, TAKIMI AS, MARQUES CM, BERGMANN CP. **HVOF-coatings against high temperature erosion (300 °C) by coal fly ash in thermoelectric power plant**. Mat. Design (2006); 27: 236-42.

MATEOS, L; CUETOS, J. M; FERNÁNDEZ, E; VIJANDE, R. **Tribological behaviour of plasma-sprayed WC coatings with and without laser remelting.** Wear 239: 274-281. Spain. Elsevier Science S.A. (2000).

1 - Disponível em: < <http://www.rijeza.com.br/novidades/substituicao-do-cromo-duro-atraves-de-revestimentos-contradesgastes-aplicados-por>> Acesso em: dez. 2016.