

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JOSÉ MARCELO MORIMÃ LIMA RODRIGUES**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO PROCESSO DE REFUSÃO POR LASER DE FIBRA  
EM UM AÇO SAE 1020 REVESTIDO COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO VIA  
HVOF**

**Alegrete  
2019**

**JOSÉ MARCELO MORIMÃ LIMA RODRIGUES**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO PROCESSO DE REFUSÃO POR LASER DE FIBRA  
EM UM AÇO SAE 1020 REVESTIDO COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO VIA  
HVOF**

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.

Orientador: Thiago da Silveira

**Alegrete  
2019**

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).

R732e Rodrigues, José Marcelo Morimã Lima

Estudo dos Efeitos do Processo de Refusão por Laser de Fibra em um Aço SAE 1020 Revestido com Carbetto de Tungstênio via HVOF / José Marcelo Morimã Lima Rodrigues.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.

“Orientação: Thiago da Silveira”.

1. Desgaste Abrasivo. 2. HVOF. 3. Carbetto de Tungstênio. 4. Refusão. 5. Laser de Fibra. I. Título.

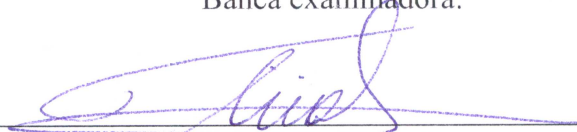
**JOSÉ MARCELO MORIMÃ LIMA RODRIGUES**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO PROCESSO DE REFUSÃO POR LASER DE FIBRA  
EM UM AÇO SAE 1020 REVESTIDO COM CARBETO DE TUNGSTÊNIO VIA  
HVOF**

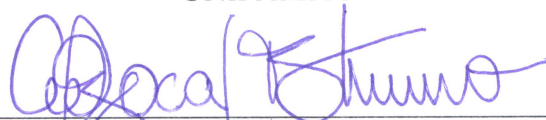
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de Novembro de 2019.

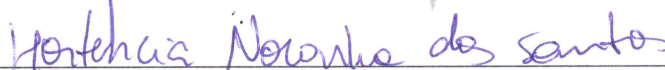
Banca examinadora:



Prof. Me. Thiago da Silveira  
Orientador  
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno  
UNIPAMPA



Prof. Eng. Mecânica Hortencia Noronha dos Santos  
UNOPAR

Dedico este trabalho à minha família, em especial meu pai Marcelo.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de agradecer aos professores da Universidade Federal do Pampa pelo conhecimento compartilhado, principalmente à Prof. Dra. Ana Claudia Costa de Oliveira e o Prof. Me. Thiago da Silveira.

À empresa Rijeza Metalurgia e ao Laboratório de Mecânica de Precisão - Divisão de Laser, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, por possibilitarem a realização dos processos de aspensão térmica e refusão por laser de fibra.

À minha família pelo apoio e confiança depositada em mim durante todo o curso, principalmente meu pai Marcelo e minha avó Ana.

Aos meus colegas de curso Ricardo, Luiz Felipe e Eysler que me acompanharam e me ajudaram a enfrentar as dificuldades ao decorrer do curso.

Ao meu amigo Yago Mansilla e aos seus pais Gibson Mansilla e Débora Mansilla, que mesmo de longe, sempre me ajudaram e me auxiliaram.

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.  
Talvez por isso tão poucos se dedicam a ele”.

Henry Ford

## RESUMO

O desgaste é um fenômeno que ocorre devido ao contato entre superfícies, resultando em modificações e possíveis problemas ao decorrer do tempo. Esses problemas são frequentemente encontrados em componentes de máquinas agrícolas devido ao contato existente entre os grãos e as superfícies metálicas. Tendo em vista a necessidade da diminuição dos problemas causados por desgaste abrasivo em equipamentos que tem contato direto com grãos em movimento, o presente estudo tem o objetivo de avaliar os efeitos do processo de refusão por laser de fibra Yb (Itérbio) em um aço SAE 1020 com revestimento superficial de WC (Carbeto de Tungstênio) depositado via aspersão térmica através do método HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*). Esse revestimento apresenta elevada dureza, que é o principal fator para obter resistência ao desgaste abrasivo. O processo de refusão por laser de fibra aumenta a adesão do revestimento ao substrato. Assim, foram aplicados cinco parâmetros diferentes do laser, com a finalidade de obter a melhor adesão entre as camadas e a melhor resistência ao desgaste por abrasão. Através de análises metalográficas com o MEV (Microscopia Eletrônica por Varredura) e de ensaios de microdureza foi possível determinar o melhor parâmetro de aplicação do laser. Então, este parâmetro foi avaliado no ensaio de desgaste abrasivo, conforme a norma ASTM G65. Dessa forma, para o melhor parâmetro, obteve-se uma espessura de revestimento de 301,8  $\mu\text{m}$ , maior valor médio de microdureza de 1308,43 HV e taxa de perda de volume média de 0,2472  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Quando comparados com os valores bibliográficos, os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que ficou evidente a melhora na adesão do revestimento de WC no aço SAE 1020 e a boa resistência ao desgaste por abrasão.

Palavras-Chave: Desgaste Abrasivo, HVOF, Carbeto de Tungstênio, Refusão, Laser de Fibra.



## ABSTRACT

Wear is a phenomenon that occurs due to the contact between surfaces, resulting in modifications and possible problems over time. These problems are often found in agricultural machine components due to the contact between grains and metal surfaces. In view of the need to reduce the problems caused by abrasive wear in equipments that have direct contact with moving grains, the study aims to evaluate the effects of the Yb (Ytterbium) fiber laser remelting process on a SAE 1020 steel with WC (Tungsten Carbide) surface coating deposited via thermal spray by the HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) method. This coating has high hardness, which is the main factor that contributes to abrasive wear resistance. The fiber laser remelting process increases the adhesion of the coating to the substrate. Thus, five different laser parameters were applied in order to obtain the best adhesion between the layers and the best abrasion resistance. Through metallographic analysis with SEM (Scanning Electron Microscopy) and microhardness tests it was possible to determine the best laser application parameter. This parameter was then evaluated in the abrasive wear test according to ASTM G65. Thus, for the best parameter, Thus, for the best parameter, the results obtained were the following: a coating thickness of 301.8  $\mu\text{m}$ , the highest average microhardness value of 1308.43 HV and an average volume loss rate of 0.2472  $\text{mm}^3/\text{min}$ . When compared to the bibliographic values, the results were considered satisfactory, since it was evident the improvement in the adhesion of the WC coating on SAE 1020 steel and the good resistance to abrasion wear.

Keywords: Abrasive Wear, HVOF, Tungsten Carbide, Remelting, Fiber Laser.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Situação característica do desgaste adesivo. ....  | 19 |
| Figura 2 – Situação característica do desgaste abrasivo. ....   | 20 |
| Figura 3 – Desenho esquemático do ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65. ....                                    | 20 |
| Figura 4 – Representação esquemática da processo de aspersão HVOF. ....   | 22 |
| Figura 5 – Gráfico de comparação de resistência ao desgaste abrasivo para diferentes materiais. ....            | 25 |
| Figura 6 – Fluxograma do procedimento desenvolvido neste trabalho. ....   | 28 |
| Figura 7 – Tocha de aspersão Praxair TAFA JP-5000 HP/HVOF utilizada na empresa Rijeza Metalurgia. ....          | 29 |
| Figura 8 – Ilustração do corpo de prova para microscopia eletrônica por varredura e ensaio de microdureza. .... | 30 |
| Figura 9 – Ilustração do corpo de prova para ensaio de desgaste por abrasão. ....                               | 31 |
| Figura 10 – Laser de fibra Yb YLS-10000 (acoplado no cabeçote óptico YW52) utilizado no LMP-Laser da UFSC. .... | 32 |
| Figura 11 – Sentido de varredura e dimensões da área de aplicação do laser. ....                                | 33 |
| Figura 12 – Ilustração dos corpos de prova para ensaio de desgaste por abrasão. ....                            | 33 |
| Figura 13 – Cortadora de precisão Buehler IsoMet 1000. ....   | 34 |
| Figura 14 – Exemplo de amostra após o processo de corte. ....   | 35 |
| Figura 15 – Lixadeira Manual Fortel (LMF) de quatro pistas. ....  | 35 |
| Figura 16 – Pano de polimento. ....   | 36 |
| Figura 17 – Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10. ....  | 37 |
| Figura 18 – Microdurômetro Buehler Micromet 6010. ....  | 38 |
| Figura 19 – Ilustração de como foram realizadas as indentações. ....  | 38 |
| Figura 20 – Ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65. ....   | 39 |
| Figura 21 – Exemplo de corpo de prova após ensaio de desgaste abrasivo (ASTM G65). ....                         | 40 |
| Figura 22 – MEV do Aço SAE 1020 revestido com WC via HVOF (sem laser). ....                                     | 41 |
| Figura 23 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do primeiro parâmetro. ....               | 41 |
| Figura 24 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do primeiro parâmetro. ....                        | 42 |
| Figura 25 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do segundo parâmetro. ....                | 42 |
| Figura 26 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do segundo parâmetro. ....                         | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do terceiro parâmetro.<br>..... | 43 |
| Figura 28 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do terceiro parâmetro.....               | 44 |
| Figura 29 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do quarto parâmetro.<br>.....   | 44 |
| Figura 30 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do quarto parâmetro.....                 | 45 |
| Figura 31 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do quinto parâmetro.<br>.....   | 45 |
| Figura 32 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do quinto parâmetro.....                 | 46 |
| Figura 33 – Gráfico comparativo dos valores de microdureza obtidos. ....                              | 47 |
| Figura 34 – Gráfico com os maiores valores médios de microdureza obtidos.....                         | 48 |
| Figura 35 – Gráfico comparativo dos valores de taxa de perda de volume obtidos.....                   | 50 |
| Figura 36 – Gráfico comparativo dos valores de perda de volume total obtidos. ....                    | 51 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Comparação dos processos comuns de aspersão térmica. ....               | 23 |
| Tabela 2 – Composição química dos pós de carbetto de tungstênio com ligantes. .... | 24 |
| Tabela 3 – Comparação entre os lasers para refusão. ....                           | 26 |
| Tabela 4 – Parâmetros usados no processo de refusão por laser de fibra. ....       | 32 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de Alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials

Co – Cobalto

$\text{CO}_2$  – Dióxido de Carbono

$\text{CuCl}_2$  – Cloreto de Cobre

CW – Regime Contínuo

grãos/pol<sup>2</sup> – Grãos por polegada quadrada

WC – Carbetto de Tungstênio

HCl – Ácido Clorídrico

WC-12Co – Carbetto de Tungstênio com 12% de Cobalto

WC-17Co – Carbetto de Tungstênio com 17% de Cobalto

WC-10Ni – Carbetto de Tungstênio com 10% de Níquel

HV – Hardness Vickers

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel

$\text{H}_2\text{WO}_4$  – Ácido túngstico

kg – Quilograma

kg/h – Quilograma por hora

LMF – Lixadeira Manual Fortel

LMP-Laser – Laboratório de Mecânica de Precisão – Divisão de Laser

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Megapascal

mm – Milímetros

$\text{mm}^3/\text{min}$  – Milímetro cúbico por minuto

m/s – Metro por segundo

N – Newton

Nd: YAG – Neodymium-doped yttrium aluminium garnet

Ni – Níquel

r.p.m. – Rotação por minuto

SAE – Society of Automotive Engineers

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

W – Tungstênio

Yb – Itérbio

°C – Graus Celsius

μm – Micrômetros

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                           | <b>17</b> |
| 1.1 Contextualização .....                          | 17        |
| 1.2 Objetivo Geral .....                            | 18        |
| 1.3 Objetivos Específicos .....                     | 18        |
| 1.4 Justificativa.....                              | 18        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                | <b>19</b> |
| 2.1 Desgaste.....                                   | 19        |
| 2.2 Processo de Aspersão Térmica HVOF .....         | 21        |
| 2.3 Carbetto de Tungstênio (WC).....                | 23        |
| 2.4 Processo de Refusão por Laser de Fibra.....     | 25        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                           | <b>27</b> |
| 3.1 Materiais e Métodos .....                       | 27        |
| 3.2 Aspersão Térmica (HVOF) .....                   | 28        |
| 3.3 Refusão por Laser de Fibra.....                 | 31        |
| 3.4 Processo Metalográfico .....                    | 34        |
| 3.4.1 Corte .....                                   | 34        |
| 3.4.2 Lixamento.....                                | 35        |
| 3.4.3 Polimento.....                                | 36        |
| 3.4.4 Ataque Químico.....                           | 36        |
| 3.5 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)..... | 36        |
| 3.6 Ensaio de Microdureza .....                     | 37        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.7 Ensaio de Desgaste por Abrasão (ASTM G65).....  | 39        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>              | <b>40</b> |
| 4.1 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)..... | 40        |
| 4.2 Ensaio de Microdureza Vickers.....              | 46        |
| 4.3 Ensaio de Desgaste por Abrasão .....            | 50        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                 | <b>52</b> |
| 5.1 Conclusões.....                                 | 52        |
| 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....          | 53        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                            | <b>54</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

Nessa seção é realizada uma breve contextualização do tema, são apresentados os objetivos e por último, tem-se a justificativa do presente estudo.

## 1.1 Contextualização

Para uma dada aplicação, a seleção do material a ser utilizado é uma das decisões mais importantes a serem tomadas. São levados em consideração aspectos como natureza econômica, parâmetros físicos e processamento dos materiais. Para facilitar esse processo de seleção, pode-se tomar como base algumas aplicações prévias do material, como por exemplo o aço SAE 1020, que é bastante utilizado por apresentar diversos atributos positivos (BUDYNAS, 2011).

O aço SAE 1020 apresenta uma ótima relação custo-benefício quando comparado aos demais aços. Apresenta boa usinabilidade, conformabilidade e soldabilidade. Trata-se de um aço dúctil e de baixa dureza. Para algumas aplicações que requerem maiores valores de dureza, recomenda-se o endurecimento do aço através de um tratamento térmico (LUZ, 2017).

Elevadores de grãos em colheitadeiras costumam apresentar desgaste abrasivo devido à textura dos grãos que estão sendo colhidos, tendo assim uma menor vida útil em relação aos demais equipamentos. Assim, para essa aplicação, necessita-se de materiais com boa resistência ao desgaste (PANZIERA, 2016).

Para transporte de grãos de forma horizontal são utilizadas helicoides que rotacionam e conduzem os grãos ao longo da espira. Essa movimentação gera um atrito entre as faces da espiral e os grãos, resultando em um desgaste abrasivo (GEHRKE, 2017).

O desgaste é um fenômeno que ocorre devido ao contato entre superfícies, sendo pelo menos uma em movimento, e que resulta em modificações na superfície metálica, podendo gerar problemas ao decorrer do tempo. Esse fenômeno pode ser reduzido com uma melhora no acabamento das superfícies em contato e com o aumento da dureza do metal. A boa resistência ao desgaste dos metais pode ser obtida através de tratamentos térmicos e pela aplicação de revestimentos superficiais. Além disso, também podem ser utilizados tratamentos termoquímicos e meios mecânicos como encruamento (CHIAVERINI, 2005).

O processo de aspersão térmica HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) é um dos processos que possibilita obter camadas de elevada dureza para proteção do componente base.

Cerâmicas, polímeros e metais são utilizados como revestimentos desse processo, o qual apresenta versatilidade na aplicação, nos tipos e nas espessuras de camadas produzidas (RODRIGUES, 2018). Antes da realização do HVOF, é fundamental a utilização do jateamento abrasivo por granalha, para preparar e limpar a superfície, removendo impurezas (PANZIERA, 2016).

Após o processo de aspersão térmica, irradiações de laser podem ser utilizadas para intensificar a adesão entre o substrato e o revestimento aspergido. Ao entrar em contato com o material, o laser provoca uma densificação que resulta na ligação metalúrgica entre o substrato e o revestimento. Diferentes parâmetros de aplicação do laser podem ser utilizados, buscando sempre o processo de adesão mais eficiente para garantir a resistência ao desgaste (GEHRKE, 2017).

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente estudo consiste em avaliar os efeitos tribológicos do processo de refusão por laser de fibra Yb (Itérbio) em um aço SAE 1020 com revestimento superficial de WC (Carbeto de Tungstênio) depositado via HVOF.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Avaliar a microestrutura a partir de análises metalográficas;
- Determinar o perfil de microdureza;
- Analisar a resistência ao desgaste por abrasão (conforme a norma ASTM G65) do melhor parâmetro de aplicação do laser.

## **1.4 Justificativa**

O presente estudo se justifica pela necessidade da diminuição dos problemas causados por desgaste abrasivo em equipamentos que tem contato direto com grãos em movimento. A determinação do melhor parâmetro de aplicação do laser de fibra pode contribuir para obtenção de um material com melhor adesão do revestimento no substrato, resultando em uma resistência ao desgaste adequada para as situações citadas anteriormente. Além disso, a

atividade agrícola é uma das principais atividades econômicas da região Sul do Brasil, o que intensifica a justificativa do presente estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

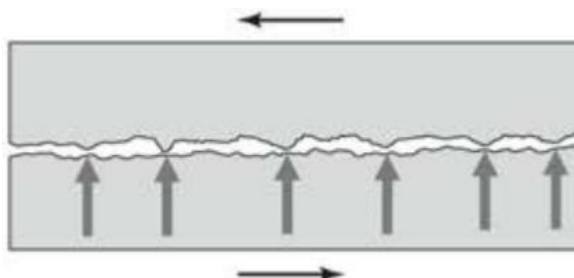
Nessa seção é apresentada a revisão da literatura relacionada ao desgaste, ao processo de aspersão térmica HVOF, ao carbetto de tungstênio e ao processo de refusão por laser de fibra.

### 2.1 Desgaste

Durante o movimento relativo entre uma superfície e outro material, ambos em contato entre si, pode ocorrer a perda progressiva de massa. Esse fenômeno é chamado de desgaste, tratando-se de um dano em uma superfície sólida (ASTM G77-91 apud COZZA, 2006).

Os tipos mais comuns de desgaste são os adesivos e abrasivos. O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies metálicas deslizantes (em contato) apresentam asperezas, funcionando como pequenas áreas que concentram a pressão de contato e o calor dissipado por atrito, resultando na soldagem (adesão) desses pontos. Com a continuidade do movimento relativo das superfícies, ocorrem falhas por cisalhamento nesses pontos, criando novas asperezas e possibilitando a ocorrência de novas soldas e falhas na superfície do material. A Figura 1 apresenta a situação característica do desgaste adesivo, identificando o movimento das duas superfícies metálicas e os pontos de contato das asperezas (JUVINALL, 2013).

Figura 1 – Situação característica do desgaste adesivo.

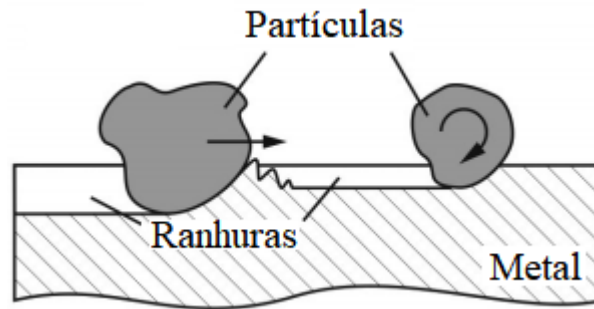


Fonte: Juvinal (2013).

O desgaste abrasivo ocorre devido ao atrito de partículas duras e pequenas (abrasivas) sobre uma superfície, como grãos por exemplo (JUVINALL, 2013). É caracterizado pela

penetração de partículas não metálicas de caráter abrasivo na superfície do metal, resultando no arrancamento de partículas metálicas da superfície (CHIAVERINI, 2005). A Figura 2 apresenta a situação característica do desgaste abrasivo, identificando o atrito entre as partículas e o metal.

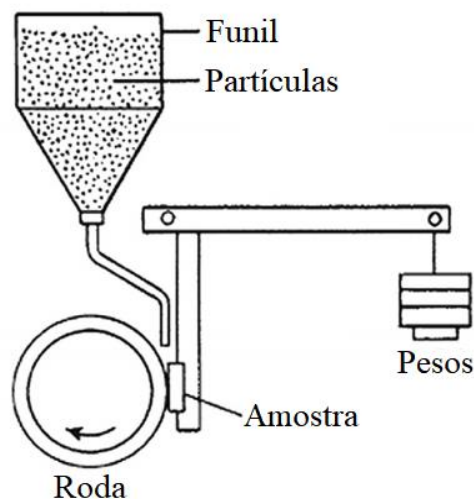
Figura 2 – Situação característica do desgaste abrasivo.



Fonte: Adaptado de Kandeve, Vencl e Karastoyanov (2016).

Para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de um determinado material, tem-se o ensaio da norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) G65. O ensaio simula uma situação real de desgaste em que partículas duras são forçadas e movimentadas sobre uma superfície sólida, no caso o metal a ser analisado (PANZIERA, 2016). A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65. As partículas caem sobre a amostra, a qual está em contato com uma roda de borracha em movimento. Pesos são utilizados para garantir o contato entre a amostra e a roda.

Figura 3 – Desenho esquemático do ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65.



Fonte: Adaptado de Hyttel et al. (2013).

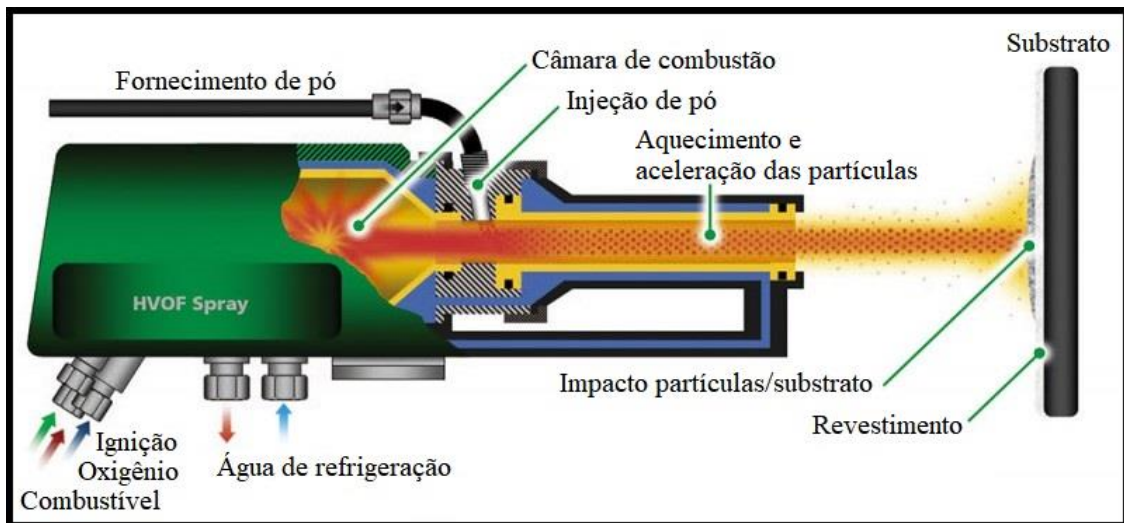
Os principais fatores que garantem a resistência ao desgaste são o acabamento da superfície metálica, a resistência mecânica, a tenacidade e a dureza. O acabamento da superfície deve eliminar todas as irregularidades e asperezas, evitando possíveis pontos que funcionem como pequenas áreas de contato. Altos valores de resistência mecânica e tenacidade dificultarão o arrancamento de partículas metálicas. A dureza é o fator mais importante, pois é o fator primordial para evitar a penetração inicial na superfície. É importante ressaltar que para garantir a resistência ao desgaste, deve-se evitar estruturas excessivamente frágeis (CHIAVERINI, 2005).

## **2.2 Processo de Aspersão Térmica HVOF**

A pulverização de oxicomcombustível de alta velocidade (HVOF) foi desenvolvida durante a década de 1980. Nesse processo, ocorre a queima contínua de uma mistura de oxigênio e combustível dentro de uma câmara de combustão. Os combustíveis mais utilizados nesse processo são o querosene, hidrogênio, gás natural, metano, acetileno e propano. Através de um bico é emanado o gás resultante da queima a uma pressão de aproximadamente 1 MPa, com velocidade superior a 1000 m/s. É realizada a injeção do material em pó, que é aquecido e acelerado em direção ao substrato. Então, com o impacto dessas partículas de pó em alta velocidade, forma-se o revestimento sobre o substrato (PAPYRIN apud KURODA et al., 2008).

A temperatura do gás resultante da combustão pode variar de 2500 a 3100 °C. Ao sair da câmara de combustão por um barril de pequeno diâmetro (geralmente de 8 a 9 mm), forma-se um jato de gás supersônico com velocidades de partículas muito altas. Os materiais em pó utilizados no processo podem ser pulverizados a taxas típicas de 2,3 a 14 kg/h. Como resultado, esse processo obtém revestimentos extremamente densos e com boa aderência (ASM, 2004). A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do processo de aspersão HVOF. São identificadas todas as etapas do processo, desde a entrada de oxigênio e combustível até o impacto das partículas de pó no substrato.

Figura 4 – Representação esquemática da processo de aspersão HVOF.



Fonte: Adaptado de Flame Spray Technologies (2019).

Em comparação com o spray convencional de chama, o spray HVOF aumenta significativamente as forças de união e as densidades de revestimento, através do aumento da temperatura e velocidade das partículas ao confinar os gases e partículas em combustão. As altas velocidades deste processo impedem a oxidação e decarbonetação de carbonetos que ocorrem em revestimentos pulverizados com plasma (ASM, 2004).

Os parâmetros de operação do processo são de suma importância para obter as características tribológicas, metalúrgicas e mecânicas desejadas. Pode-se alterar os parâmetros da câmara de combustão, controle do fluxo de oxigênio e de combustível para maximizar a velocidade das partículas e obter tensões residuais compressivas, que são importantes para sobrepor as tensões de tração resultantes do resfriamento (AZIZPOUR; TOLOUEI-RAD, 2019).

A principal característica do processo HVOF é a capacidade de produzir revestimentos densos com poucas transformações de fase, baixa quantidade de oxidação e de degradação. Fatores como condutividade térmica do material, temperatura da chama, ponto de fusão do material e tempo de permanência das partículas determinam se as partículas derretem total ou parcialmente (SUN et al. apud AMIN; PANCHAL, 2016). A Tabela 1 apresenta a comparação entre os processos mais utilizados de aspersão térmica.

Tabela 1 – Comparação dos processos comuns de aspersão térmica.

| Processo                   | Material de Revestimento | Fonte de Calor                          | Temperatura da Chama (°C) | Velocidade do Gás (m/s) | Porosidade (%) | Adesão do Revestimento (MPa) |
|----------------------------|--------------------------|---|---------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------|
| Aspersão por Plasma        | Pó                       | Chama de Plasma                         | 12000 – 16000             | 500 – 600               | 2 – 5          | 40 – 70                      |
| Aspersão por Arco Elétrico | Arame                    | Arco Elétrico                           | 5000 – 6000               | < 300                   | 5 – 10         | 28 – 41                      |
| Aspersão por Chama         | Arame                    | Combustão de Oxidocombustível           | 3000                      | < 300                   | 5 – 10         | 14 – 21                      |
| HVOF                       | Pó                       | Combustão de Gás Oxigênio e Combustível | < 3200                    | 1200                    | 1 – 2          | > 70                         |

Fonte: Adaptado de Amin e Panchal (2016).

Todos os processos de aspersão térmica consistem na projeção de partículas em uma superfície preparada e limpa para criar um revestimento. A preparação e a limpeza são realizadas a partir do jateamento abrasivo por granalha, com o objetivo de remover resíduos da superfície (PANZIERA, 2016). A escolha do processo é realizada com base no custo, características desejadas para o revestimento e adequação do processo para determinado material. Pode-se afirmar que, entre os processos de aspersão térmica citados, o HVOF é o processo mais vantajoso (AMIN; PANCHAL, 2016).

### 2.3 Carbetos de Tungstênio (WC)

O carbeto de tungstênio é um material que apresenta elevada dureza e conseqüentemente, elevada resistência ao desgaste. Suas principais aplicações são em esferas para moagem de alta energia, ferramentas de corte, abrasivos, brocas, matrizes e perfuratrizes (GONÇALVES, 2009).

Em um primeiro momento, o carbeto de tungstênio, apesar das características positivas, não atraiu muita atenção, pois houveram tentativas de prepará-lo para uso como ferramenta de corte através de processos de fundição e retificação, porém eram processos difíceis de realizar com esse material e o resultado final apresentava muitas falhas, principalmente fraturas. Posteriormente, o processo de metalurgia do pó resolveu o problema, possibilitando o manuseio do carbeto de tungstênio sem perder sua dureza e resistência ao desgaste (TRENT, 1983).

O pó de carbetos de tungstênio pode ser obtido através da carbonetação do pó de tungstênio metálico (redução de óxidos de tungstênio) ou da carbonetação direta dos óxidos de tungstênio. As matérias primas que podem ser usadas nesse processo de obtenção do pó de WC são o ácido tungstico ( $H_2WO_4$ ) e os óxidos originados do paratungstato de amônia (GUTIÉRREZ, 2002).

Para garantir a resistência ao desgaste abrasivo quando aplicado por aspersão térmica, recomenda-se a adição de um ligante metálico ao WC. Geralmente usa-se cobalto (Co) ou níquel (Ni), possibilitando uma diminuição da fragilidade da liga. (RIJEZA, 2019). A Tabela 2 apresenta a composição química dos pós de carbetos de tungstênio com ligantes metálicos. São identificadas as porcentagens de carbono, cobalto, níquel e tungstênio de cada pó.

Tabela 2 – Composição química dos pós de carbetos de tungstênio com ligantes.

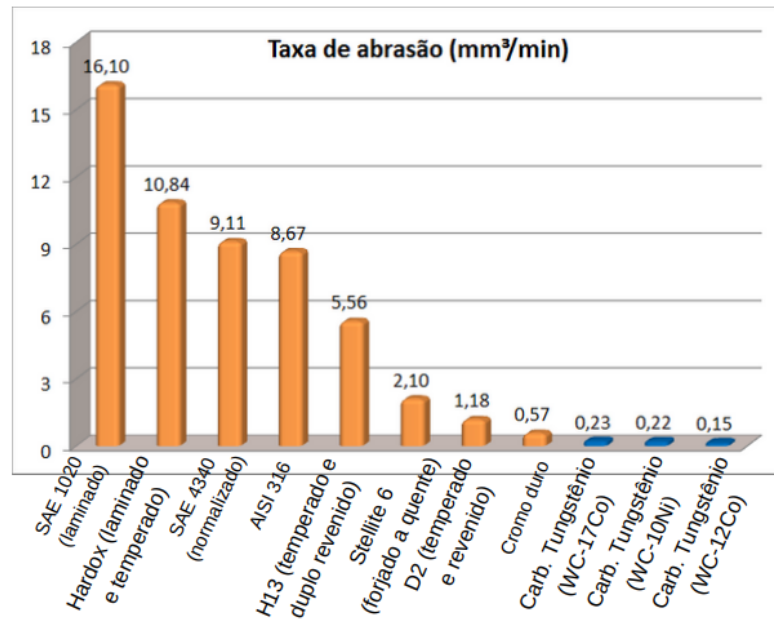
| <b>Pó</b> | <b>C (%)</b> | <b>Co (%)</b> | <b>Ni (%)</b> | <b>W (%)</b> |
|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| WC-12Co   | 4 – 5,4      | 11 – 12       | -             | Remanescente |
| WC-17Co   | 5,3          | 17            | -             | Remanescente |
| WC-10Ni   | 3,6          | -             | 10,5          | Remanescente |

Fonte: Adaptado de Rijeza Metalurgia (2019).

A principal função do carbetos de tungstênio como revestimento é resistir a ambientes de desgaste severo para mecanismos de desgaste como erosão de partículas, abrasão e adesão (NERZ; KUSHNER; ROTOLICO, 1992). A Figura 5 apresenta um gráfico com a comparação da resistência ao desgaste por abrasão do carbetos de tungstênio e de outros metais. Conforme a norma ASTM G65, a avaliação é realizada com base na perda de volume da amostra por minuto de exposição ( $mm^3/min$ ).



Figura 5 – Gráfico de comparação de resistência ao desgaste abrasivo para diferentes materiais.



Fonte: Rijeza Metalurgia (2019).

A microestrutura do carbeto de tungstênio apresenta partículas finas de metal duro uniformemente distribuídas. Trata-se de uma microestrutura densa e com baixa porosidade. As principais propriedades do carbeto de tungstênio com ligantes metálicos são (RIJEZA, 2019):

- Dureza (HV 0.3): 1200 – 1400 (Co); 1100 (Ni);
- Rugosidade em bruto: 3  $\mu\text{m}$ ;
- Rugosidade com pós acabamento: 0,1  $\mu\text{m}$ ;
- Porosidade: < 1%;
- Adesão: > 82 MPa;
- Espessura máxima: 0,5 mm;
- Resistência ao desgaste abrasivo: 0,15 – 0,23  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

## 2.4 Processo de Refusão por Laser de Fibra

A utilização de tratamentos superficiais por laser permite alcançar uma grande diversidade de propriedades de superfície. Dependendo das propriedades desejadas, pode-se usar tratamentos superficiais por laser diferentes. As principais categorias desse tratamento térmico superficial são (PEREZ, 2015):

- Aquecimento da superfície por laser (*laser surface heating*): o laser funciona como uma fonte de calor localizada para obter endurecimento superficial. As temperaturas não excedem o ponto de fusão do material, tratando-se de uma têmpera por indução;
- Fusão da superfície por laser (*laser surface melting*): as temperaturas do processo excedem o ponto de fusão do material, possibilitando alterações na microestrutura e maior adesão de revestimentos ao substrato. As técnicas mais utilizadas são a refusão por laser (*laser remelting*), liga de superfície por laser (*laser surface alloying*) e injeção de partículas por laser (*laser particle injection*);
- Choque da superfície por laser: (*laser surface shocking*): a aplicação de um laser com elevada densidade de potência em um tempo curto gera uma onda de choque, que ocasiona na deformação plástica da superfície. Esse processo é pouco utilizado para aplicações industriais.

Tratando-se de um processo eficiente para melhorar propriedades superficiais através da alteração de microestruturas, o tratamento térmico superficial por laser despertou interesse industrial e científico (SILVA, 2011). A eficiência do processo de refusão por laser depende de variáveis como tempo de interação, comprimento de onda, taxa de resfriamento, potência, capacidade de absorção (substrato), tipo de corrente, diâmetro do feixe e velocidade de deslocamento do substrato em relação ao laser. Fatores como tempo de permanência do laser e potência podem determinar a profundidade da zona de liga entre o revestimento e o substrato (SINGH, 1994).

Fatores como baixa manutenção, alta durabilidade e vantagens inerentes de sistemas de fibras ópticas como facilidade de manipulação, pequenas dimensões dos equipamentos e facilidade no transporte, tem dado destaque ao processo de refusão por lasers de fibra, principalmente nos últimos anos (PEREZ, 2015). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os lasers para refusão mais utilizados no mercado (VERHAEGHE; HILTON, 2005).

Tabela 3 – Comparação entre os lasers para refusão.

| <b>Características</b>          | <b>Fibra Yb</b> | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>Nd: YAG</b>  |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Mobilidade do laser             | Alta            | Baixa                 | Baixa           |
| Comprimento de onda (nm)        | 1070            | 10600                 | 1060            |
| Custo aproximado por kW (US\$)  | 130 – 150       | 60                    | 150 – 180       |
| Transmissão do feixe            | Fibras e Lentes | Espelho e Lentes      | Fibras e Lentes |
| Eficiência energética (%)       | 20 – 30         | 5 – 8                 | 10 – 20         |
| Potência máxima de saída (kW)   | 20              | 15                    | 6               |
| Intervalo de manutenção (horas) | 100000          | 2000                  | 2000 – 5000     |

Fonte: Adaptado de Verhaeghe e Hilton (2005).

As principais vantagens do processo de refusão por laser estão relacionadas a possibilidade de produzir boa ligação entre os revestimentos e o substrato, microestruturas de grão fino, pequenas zonas afetadas pelo calor no substrato, fases metaestáveis e amorfas, superfícies lisas e com baixa porosidade, proteção contra oxidação, corrosão e desgaste. De modo geral, pode-se dizer que através desse processo é possível melhorar propriedades físicas, químicas e mecânicas, possibilitando a obtenção de um material base barato modificado localmente para melhorar a resistência à oxidação, corrosão, desgaste ou erosão (SINGH, 1994). Também é importante destacar as altas taxas de resfriamento. Essas taxas são obtidas pelo fato do material adjacente não afetado pela fusão resfriar a poça de metal líquido (MORENO et al., 2014).

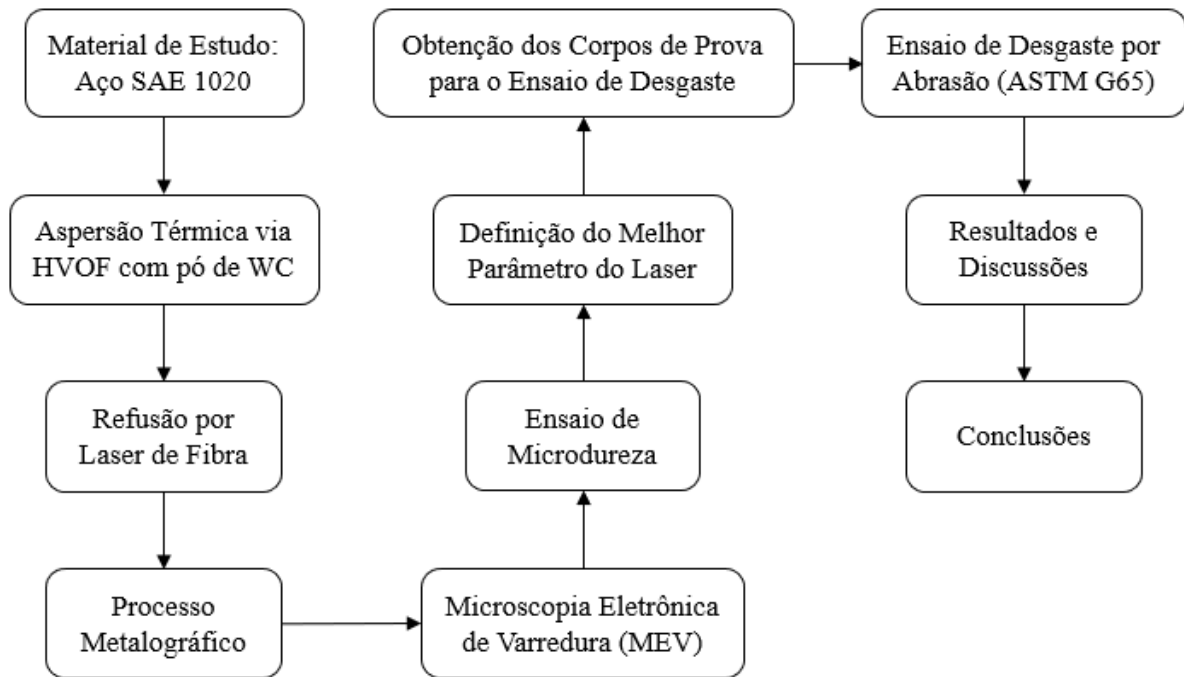
### **3 METODOLOGIA**

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. São apresentados os materiais e métodos, o processo de aspensão térmica via HVOF, o processo de refusão por laser de fibra, o processo metalográfico, a microscopia eletrônica de varredura, o ensaio de microdureza e o ensaio de desgaste por abrasão.

#### **3.1 Materiais e Métodos**

Para facilitar o entendimento dos materiais e métodos utilizados, a Figura 6 apresenta um fluxograma do procedimento desenvolvido neste trabalho, desde a obtenção das amostras até a realização dos ensaios para obter os resultados e chegar às conclusões.

Figura 6 – Fluxograma do procedimento desenvolvido neste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.2 Aspersão Térmica (HVOF)

O processo de aspersão térmica via HVOF foi realizado no laboratório da empresa Rijeza Metalurgia. Foi utilizada a tocha de aspersão Praxair TAFE JP-5000 HP/HVOF com combustão de propano, fixada em um braço robótico. A distância entre a extremidade da tocha e a superfície dos corpos de prova foi de 300 mm e a direção do jato foi perpendicular ao corpo de prova, ou seja, o ângulo de aspersão entre a superfície do substrato e a direção do jato da tocha foi de 90°.

É importante ressaltar que antes do processo de aspersão foi utilizado um jato abrasivo por granalha de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) para remover impurezas e preparar a superfície para melhor adesão do pó de WC. A Figura 7 apresenta a tocha de aspersão Praxair TAFE JP-5000 HP/HVOF sendo utilizada na empresa Rijeza Metalurgia.

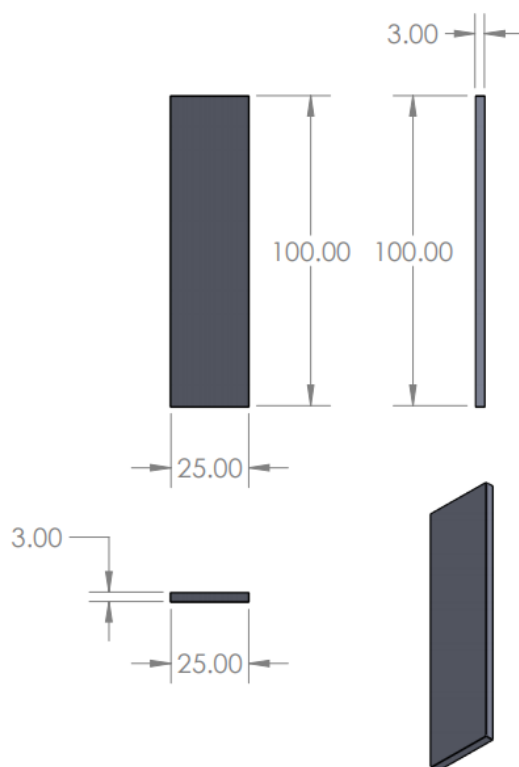
Figura 7 – Tocha de aspersão Praxair TAFE JP-5000 HP/HVOF utilizada na empresa Rijeza Metalurgia.



Fonte: Rijeza Metalurgia (2019).

Primeiro foi obtido um corpo de prova com as dimensões 100 x 25 x 3 mm, como apresentado na Figura 8. Este corpo de prova foi feito para receber a aplicação de todos os parâmetros do laser, resultando em uma pequena amostra de cada parâmetro para serem utilizadas na microscopia eletrônica por varredura e nos ensaios de microdureza.

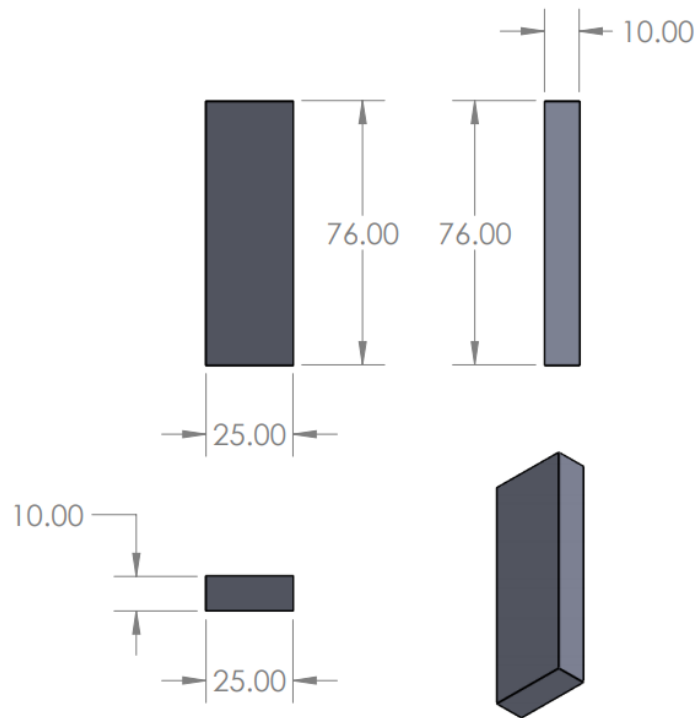
Figura 8 – Ilustração do corpo de prova para microscopia eletrônica por varredura e ensaio de microdureza.



Fonte: Autoria própria (2019).

Após a realização da microscopia eletrônica por varredura e dos ensaios de microdureza, foi possível determinar o parâmetro do laser que proporcionou melhores condições para garantir a resistência ao desgaste por abrasão. A partir disso, foram obtidos mais quatro corpos de prova com as dimensões 76 x 25 x 10 mm, conforme a Figura 9. Estes corpos de prova foram feitos para receber a aplicação do parâmetro escolhido, resultando em quatro amostras grandes do melhor parâmetro após o tratamento com feixe de laser para serem utilizadas nos ensaios de desgaste por abrasão.

Figura 9 – Ilustração do corpo de prova para ensaio de desgaste por abrasão.

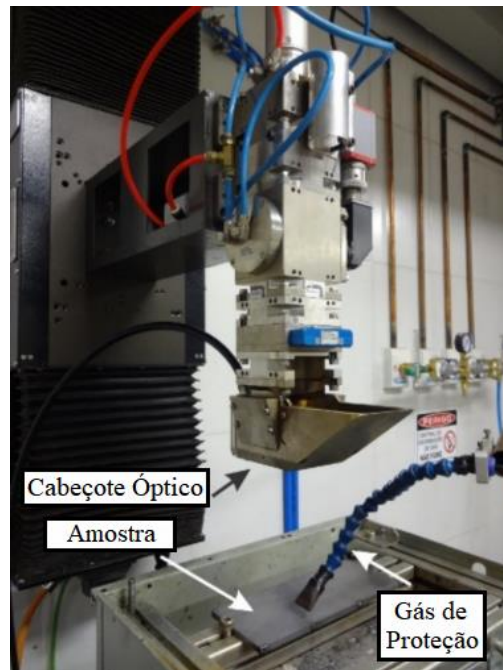


Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.3 Refusão por Laser de Fibra

O processo de refusão por laser de fibra foi realizado no Laboratório de Mecânica de Precisão - Divisão de Laser (LMP-Laser), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Foi utilizado o laser de fibra de Itérbio (Yb), modelo YLS-10000, do fabricante IPG Photonics, acoplado a um cabeçote óptico, modelo YW52, do fabricante Precitec. O laser possui comprimento de onda de 1070 nm, geração por 18 módulos e regime contínuo (CW). Argônio foi usado como gás de proteção. A Figura 10 apresenta o laser de fibra Yb YLS-10000, acoplado no cabeçote óptico YW52, utilizado no LMP-Laser da UFSC.

Figura 10 – Laser de fibra Yb YLS-10000 (acoplado no cabeçote óptico YW52) utilizado no LMP-Laser da UFSC.



Fonte: Adaptado de Paes et al. (2019).

Foram utilizados cinco parâmetros de potência diferentes para a mesma velocidade de varredura. A Tabela 4 apresenta a potência e a velocidade de varredura de cada parâmetro.

Tabela 4 – Parâmetros usados no processo de refusão por laser de fibra.

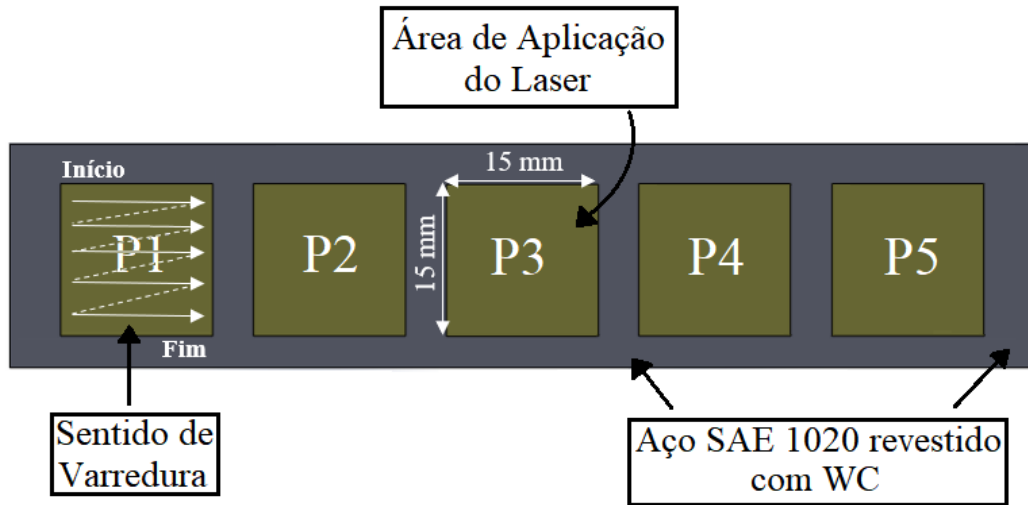
| <b>Parâmetros</b>                       | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |
|---|------|------|------|------|------|
| <b>Potência (Watts)</b>                 | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  |
| <b>Velocidade de Varredura (mm/min)</b> | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a obtenção das amostras destinadas à microscopia eletrônica por varredura e ao ensaio de microdureza, cada parâmetro do laser foi aplicado sobre uma área de 15 x 15 mm do primeiro corpo de prova de aço SAE 1020 revestido com WC. A Figura 11 apresenta como foram aplicados os cinco parâmetros do laser, identificando as dimensões da área de aplicação e o sentido de varredura utilizado para mover o feixe de laser.



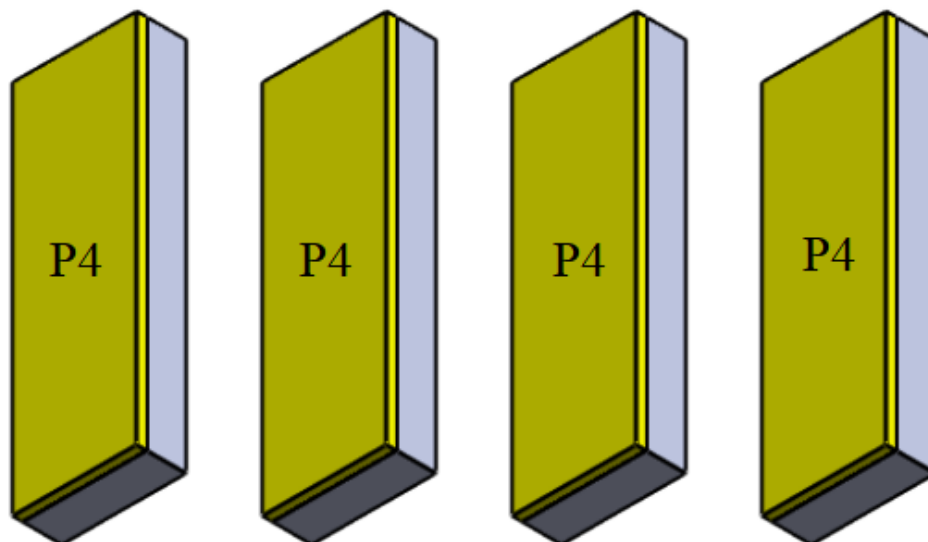
Figura 11 – Sentido de varredura e dimensões da área de aplicação do laser.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para a obtenção das amostras destinadas ao ensaio de desgaste por abrasão, o parâmetro escolhido após a análise dos resultados obtidos na microscopia eletrônica por varredura e nos ensaios de microdureza foi aplicado sobre os quatro corpos de prova restantes, como apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Ilustração dos corpos de prova para ensaio de desgaste por abrasão.



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.4 Processo Metalográfico

O procedimento metalográfico padrão foi realizado no Laboratório de Química e Metalografia da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete. Foram realizados processos de corte, lixamento, polimento e ataque químico apenas no primeiro corpo de prova, para então obter as cinco amostras destinadas à microscopia eletrônica por varredura e aos ensaios de microdureza. Optou-se por não realizar o processo de embutimento para facilitar a realização do MEV, a qual exige que as amostras apresentem pequenas dimensões.

#### 3.4.1 Corte

Os cinco parâmetros foram separados através da cortadora de precisão, modelo IsoMet 1000, do fabricante Buehler, apresentada na Figura 13. Esse equipamento permite a realização do corte sem danificar a amostra, utilizando uma carga constante para direcionar a amostra à lâmina e um fluido lubrificante para reduzir o atrito e a temperatura. A velocidade angular da lâmina foi de 850 r.p.m. e a carga mecânica foi de 0,5 kg. Além da separação dos parâmetros, cada um deles foi cortado ao meio para então serem lixados e polidos, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 13 – Cortadora de precisão Buehler IsoMet 1000.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 14 – Exemplo de amostra após o processo de corte.



Fonte: A autoria própria (2019).

### 3.4.2 Lixamento

Para o processo de lixamento foi utilizada a Lixadeira Manual Fortel (LMF) de quatro pistas, apresentada na Figura 15. Nesse equipamento tem-se um plano inclinado com água corrente para evitar o acúmulo de resíduos durante o processo de lixamento. Foram utilizadas lixas de granulometrias 120, 220, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 grãos/pol<sup>2</sup>, rotacionando o sentido de lixamento das amostras em 90° a cada troca de lixa, até obter uma superfície espelhada.

Figura 15 – Lixadeira Manual Fortel (LMF) de quatro pistas.



Fonte: A autoria própria (2019).

### 3.4.3 Polimento

Após o processo de lixamento, as amostras foram polidas em um pano de polimento com óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), apresentado na Figura 16. Esse processo é importante para obter o melhor acabamento possível, eliminando todos os riscos superficiais.

Figura 16 – Pano de polimento.



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.4.4 Ataque Químico

Após o processo de polimento, foi realizado o ataque químico com o reagente Kalling, composto por 5 g de  $\text{CuCl}_2$ , 100 ml de HCl e 100 ml de álcool etílico. O ataque foi feito por imersão da amostra no reagente, durante um período de aproximadamente 20 segundos, para que assim a microestrutura possa ser analisada.

### 3.5 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

O processo de microscopia foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete. O microscópio utilizado foi o EVO MA10, do fabricante Zeiss, apresentado na Figura 17. Esse equipamento permite a obtenção de imagens de alta resolução da microestrutura das amostras.

Figura 17 – Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10.



Fonte: Autoria própria (2019).

### **3.6 Ensaio de Microdureza**

O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete. Foi utilizado o microdurômetro MicroMet 6010, da fabricante Buehler, apresentado na Figura 18.

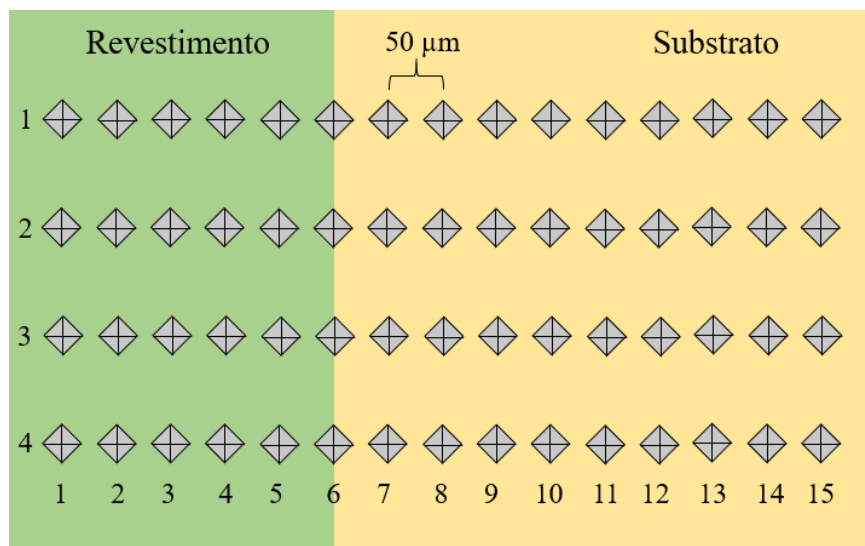
Figura 18 – Microdurômetro Buehler Micromet 6010.



Fonte: Autoria própria (2019).

O ensaio foi realizado na escala Vickers (HV), com a aplicação de uma carga de 0,5 kg durante o tempo de 10 segundos. Em cada amostra foram realizadas quatro fileiras de quinze indentações, com a distância de 50  $\mu\text{m}$  entre elas, sendo a primeira indentação na superfície do revestimento e as demais em direção ao centro da amostra, alcançando a região do substrato, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Ilustração de como foram realizadas as indentações.

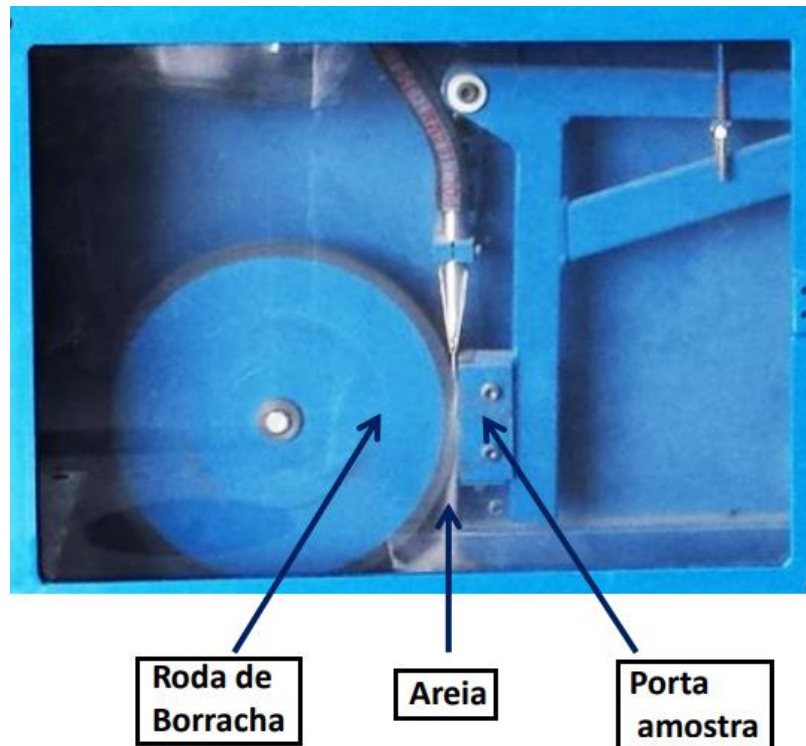


Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.7 Ensaio de Desgaste por Abrasão (ASTM G65)

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado conforme a norma ASTM G65 no laboratório da empresa Rijeza Metalurgia. O teste consiste em submeter a amostra a um ambiente de desgaste abrasivo acelerado. A amostra é pressionada contra uma roda de borracha, e entre ela e a roda, passa um fluxo de areia, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Ensaio de desgaste abrasivo conforme a norma ASTM G65.



Fonte: Rijeza Metalurgia (2019)

Com base nos dados obtidos no MEV e nos ensaios de microdureza, o melhor parâmetro foi escolhido para realizar o ensaio de desgaste por abrasão. O teste foi realizado por um período de vinte minutos, registrando os valores de perda de volume aos dez, quinze e vinte minutos de ensaio. Foi utilizada uma carga de 130 N para pressionar as amostras e a velocidade angular da roda foi de 200 r.p.m. A Figura 21 apresenta um exemplo de corpo de prova após a realização do ensaio de desgaste por abrasão conforme a norma ASTM G65.

Figura 21 – Exemplo de corpo de prova após ensaio de desgaste abrasivo (ASTM G65).



Fonte: Autoria própria (2019).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo. Os dados obtidos na microscopia eletrônica por varredura, no ensaio de microdureza Vickers e no ensaio de desgaste por abrasão são analisados.

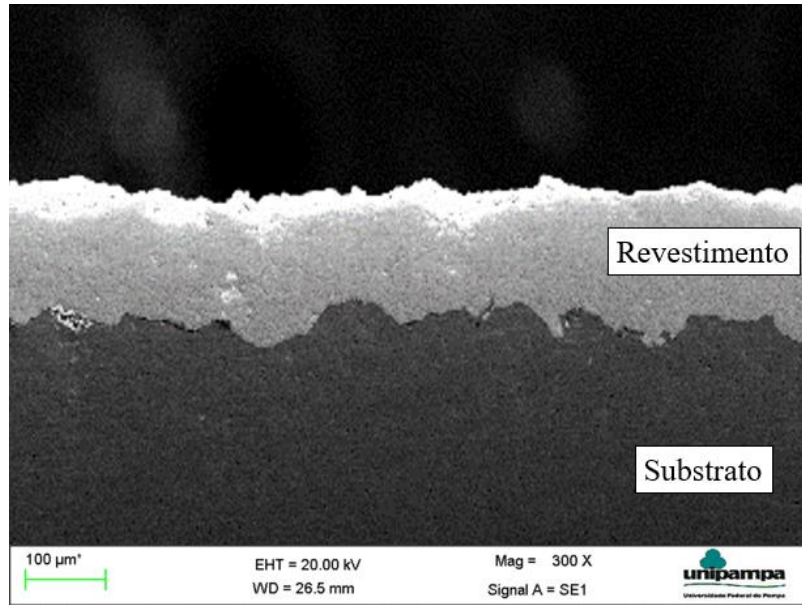
### **4.1 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)**

A partir do MEV é possível realizar a análise microestrutural das amostras, comparando-as. As imagens obtidas permitem determinar as espessuras das camadas de revestimento após a aplicação de cada parâmetro do laser de fibra. Além disso, é importante verificar a presença de trincas, poros, oxidações, vazios e regiões de refusão incompleta.

Primeiramente, a Figura 22 apresenta o aço SAE 1020 revestido com WC via HVOF sem aplicação de laser de fibra. Percebe-se que as camadas de revestimento e substrato são bem distintas. Isso se deve pelo fato do processo de aspersão térmica se tratar de um processo de deposição do pó, não havendo refusão das camadas.



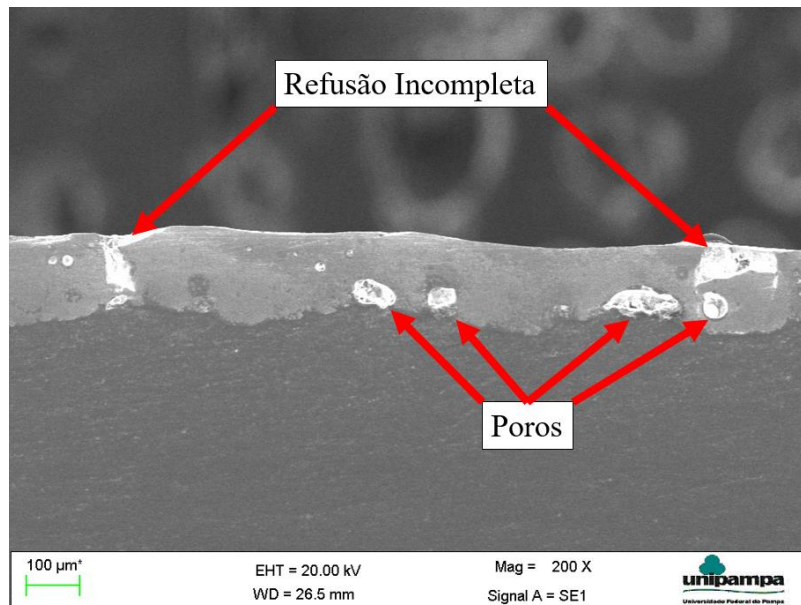
Figura 22 – MEV do Aço SAE 1020 revestido com WC via HVOF (sem laser).



Fonte: A autoria própria (2019).

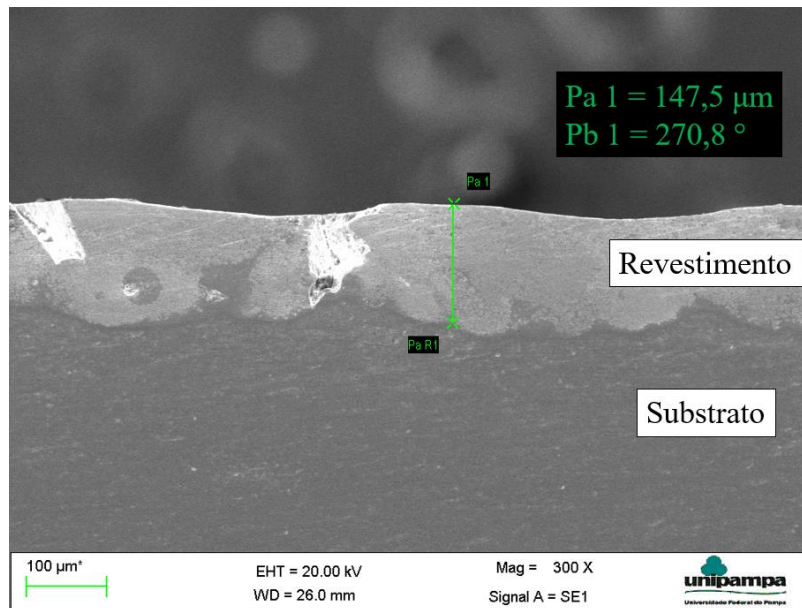
Na amostra referente ao primeiro parâmetro (200 Watts de potência), pode-se verificar a presença de regiões em que a refusão não foi completa e poros próximos ao substrato, conforme apresentado na Figura 23. A espessura da camada de revestimento após a aplicação do laser foi de 147,5 µm, como apresentado na Figura 24.

Figura 23 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do primeiro parâmetro.



Fonte: A autoria própria (2019).

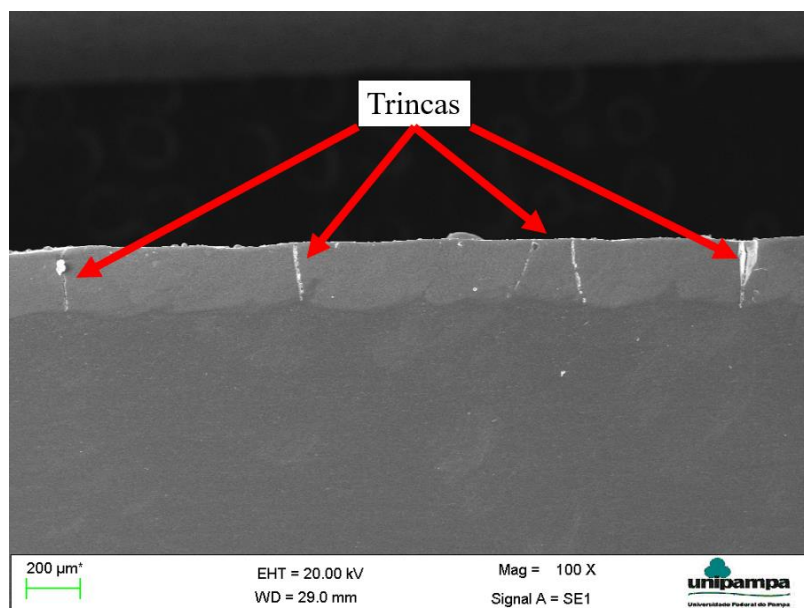
Figura 24 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do primeiro parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

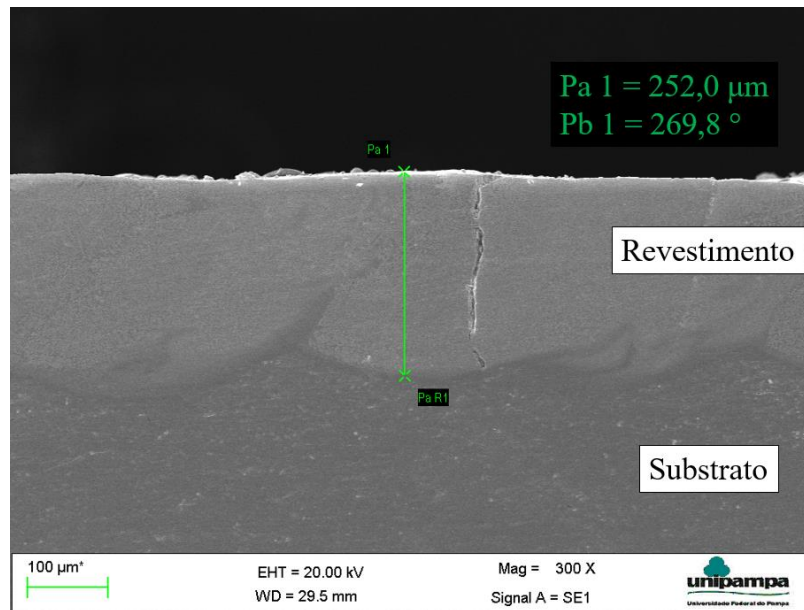
Na amostra referente ao segundo parâmetro (250 Watts de potência), pode-se verificar a presença de muitas trincas, conforme apresentado na Figura 25. A espessura da camada de revestimento após a aplicação do laser foi de 252 µm, como apresentado na Figura 26.

Figura 25 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do segundo parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

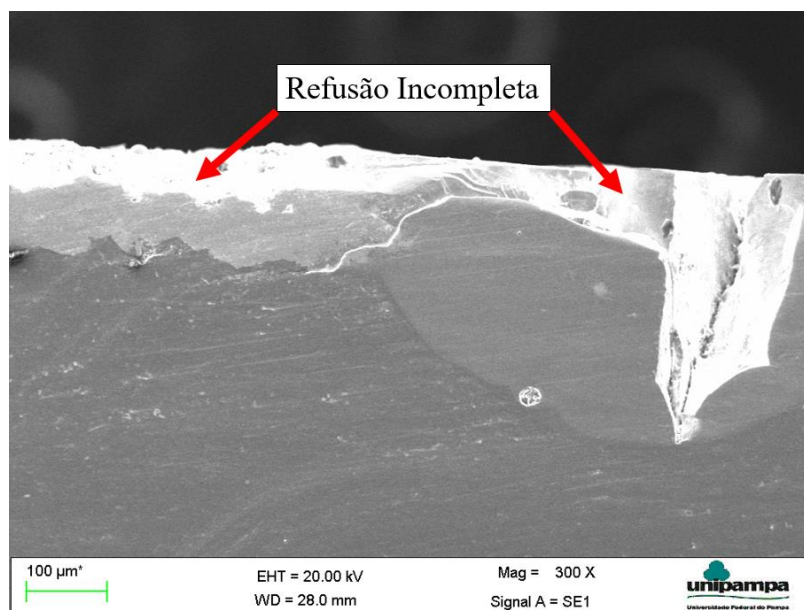
Figura 26 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do segundo parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

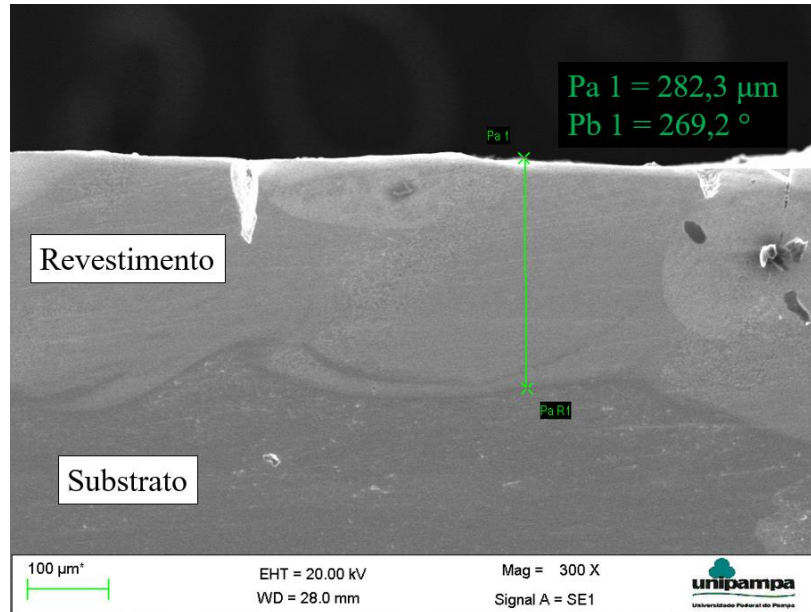
Na amostra referente ao terceiro parâmetro (300 Watts de potência), pode-se verificar a presença de uma grande região de refusão incompleta, conforme apresentado na Figura 27. A espessura da camada de revestimento após a aplicação do laser foi de 282,3 μm, como apresentado na Figura 28.

Figura 27 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do terceiro parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

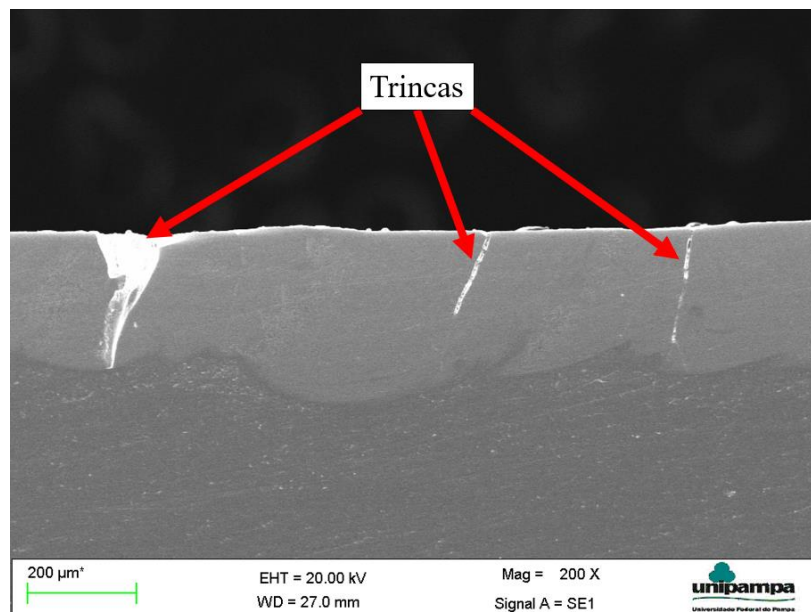
Figura 28 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do terceiro parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

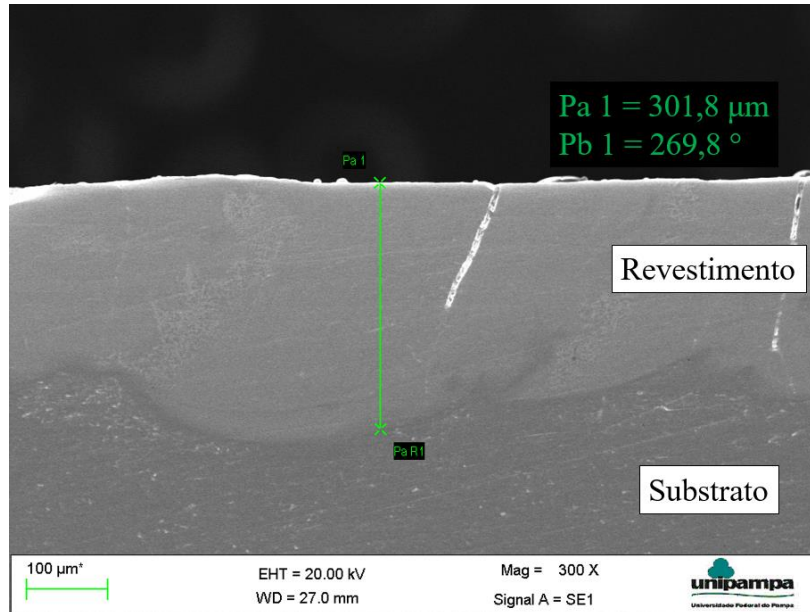
Na amostra referente ao quarto parâmetro (350 Watts de potência), pode-se verificar a presença de poucas trincas, conforme apresentado na Figura 29. A espessura da camada de revestimento após a aplicação do laser foi de 301,8 μm, como apresentado na Figura 30.

Figura 29 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do quarto parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

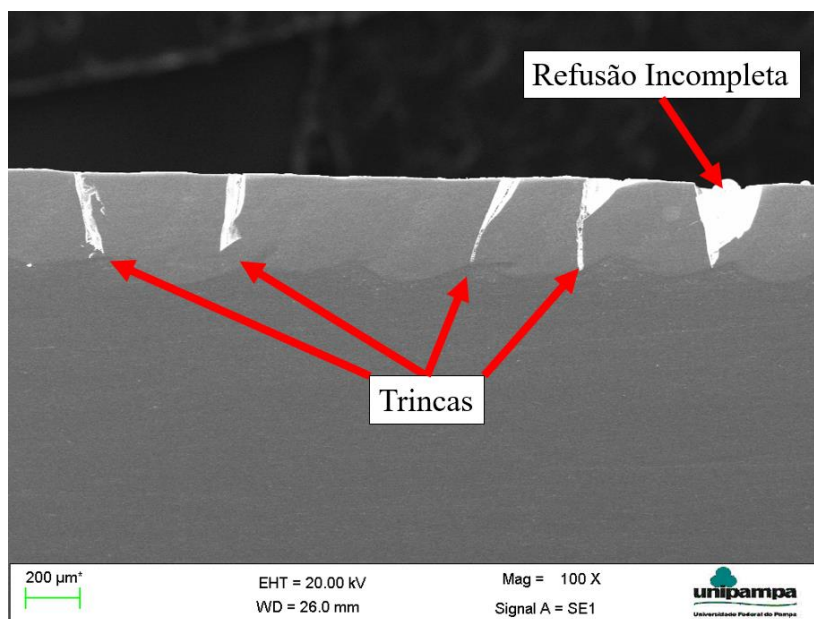
Figura 30 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do quarto parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

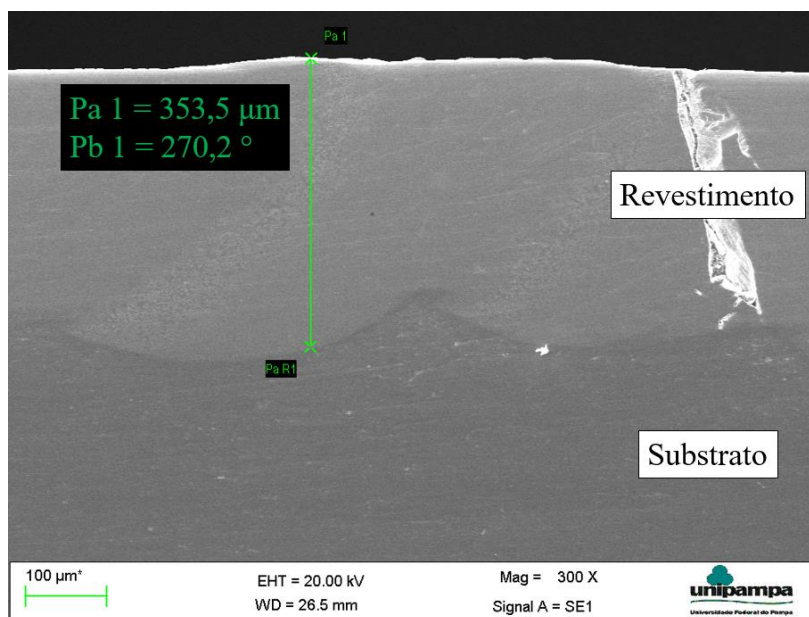
Na amostra referente ao quinto parâmetro (400 Watts de potência), pode-se verificar a presença de muitas trincas e uma região de refusão incompleta, como apresentado na Figura 31. A espessura da camada de revestimento após a aplicação do laser foi de 353,5  $\mu\text{m}$ , como apresentado na Figura 32.

Figura 31 – Falhas encontradas no revestimento obtido com a aplicação do quinto parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32 – Espessura do revestimento obtido com a aplicação do quinto parâmetro.



Fonte: Autoria própria (2019).

Com base nas imagens obtidas no MEV, é possível perceber a refusão das camadas de revestimento com o substrato. Na Figura 22, a qual não tem aplicação de laser, percebe-se que as camadas são bem distintas. A partir da Figura 23, percebe-se que com a aplicação e com o aumento da potência do laser, as camadas de revestimento e substrato ficam cada vez mais semelhantes visualmente, devido ao processo de refusão.

Pode-se afirmar que com o aumento da potência do laser, maior será a espessura do revestimento, devido a maior quantidade de energia presente para refundir a superfície. Nesse quesito, destacam-se os parâmetros 3, 4 e 5, por apresentarem os maiores valores de espessura de revestimento. Uma maior espessura de revestimento provavelmente resultará em uma melhor resistência ao desgaste, porém deve-se considerar também a dureza.

As principais falhas encontradas foram trincas, regiões de refusão incompleta e poros. Apesar de todas as amostras apresentarem falhas, destaca-se o parâmetro 4 (350 Watts de potência), por apresentar em menor quantidade.

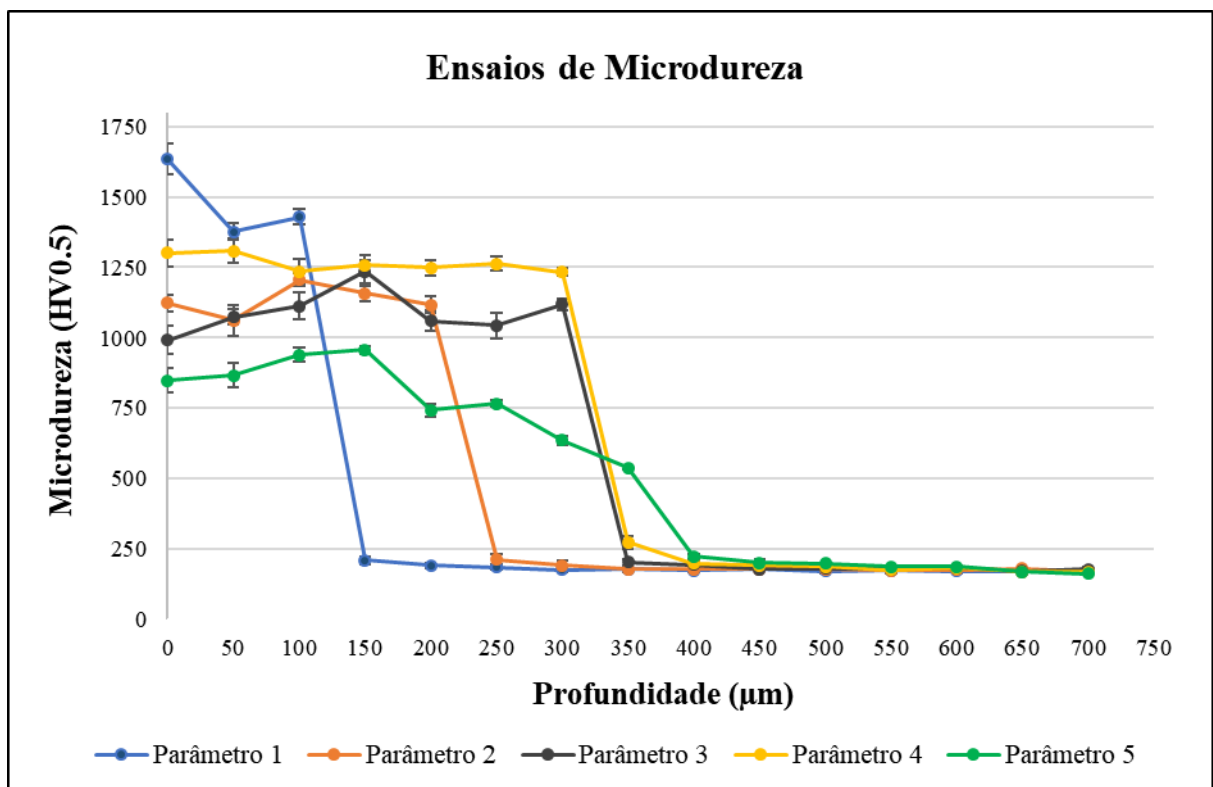
## 4.2 Ensaio de Microdureza Vickers

Como apresentado na metodologia, em cada amostra foram realizadas quatro fileiras de quinze indentações, com a distância de 50  $\mu\text{m}$  entre elas, sendo a primeira indentação na superfície do revestimento e as demais em direção ao centro da amostra, alcançando a região

do substrato. Assim, com os valores obtidos de médias e desvios-padrão, foi possível construir gráficos de microdureza por profundidade para cada parâmetro.

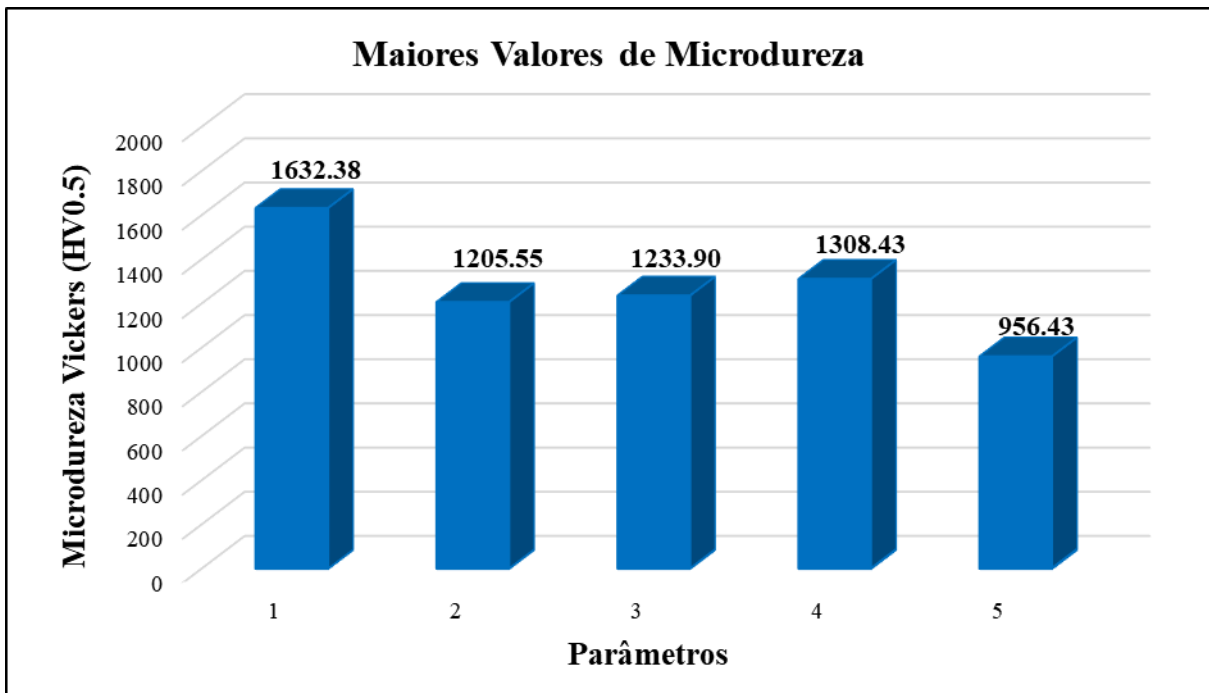
Assim, a Figura 33 apresenta o gráfico comparativo dos valores de microdureza obtidos nas cinco amostras e a Figura 34 apresenta o gráfico com os maiores valores médios de microdureza obtidos em cada amostra.

Figura 33 – Gráfico comparativo dos valores de microdureza obtidos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 34 – Gráfico com os maiores valores médios de microdureza obtidos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na amostra referente ao primeiro parâmetro (200 Watts de potência), tem-se valores de microdureza maiores que 1350 HV nas três primeiras indentações, caracterizando a região de revestimento. A partir da quarta indentação, a microdureza cai drasticamente para valores abaixo de 209,93 HV, caracterizando a região do substrato. Destaca-se a primeira indentação, localizada na superfície, que apresentou o maior valor médio de microdureza, sendo de 1632,38 HV.

Na amostra referente ao segundo parâmetro (250 Watts de potência), tem-se valores de microdureza na faixa de 1061,25 HV à 1205,55 HV nas cinco primeiras indentações, caracterizando a região de revestimento. A partir da sexta indentação, a microdureza cai drasticamente para valores abaixo de 214,13 HV, caracterizando a região do substrato. Destaca-se a terceira indentação, localizada próxima à superfície, que apresentou o maior valor médio de microdureza, sendo de 1205,55 HV.

Na amostra referente ao terceiro parâmetro (300 Watts de potência), tem-se valores de microdureza na faixa de 991,25 HV à 1233,90 HV nas sete primeiras indentações, caracterizando a região de revestimento. A partir da oitava indentação, a microdureza cai drasticamente para valores abaixo de 202,95 HV, caracterizando a região do substrato. Destaca-se a quarta indentação, localizada próxima à superfície, que apresentou o maior valor médio de microdureza, sendo de 1233,90 HV.



Na amostra referente ao quarto parâmetro (350 Watts de potência), tem-se valores de microdureza na faixa de 1232,65 HV à 1308,43 HV nas sete primeiras indentações, caracterizando a região de revestimento. A partir da oitava indentação, a microdureza cai drasticamente para valores abaixo de 274,18 HV, caracterizando a região do substrato. Destaca-se a segunda indentação, localizada próxima à superfície, que apresentou o maior valor médio de microdureza, sendo de 1308,43 HV.

Na amostra referente ao quinto parâmetro (400 Watts de potência), tem-se valores de microdureza na faixa de 539,70 HV à 956,43 HV nas oito primeiras indentações, caracterizando a região de revestimento. A partir da nona indentação, a microdureza cai drasticamente para valores abaixo de 225,10 HV, caracterizando a região do substrato. Destaca-se a quarta indentação, localizada próxima à superfície, que apresentou o maior valor médio de microdureza, sendo de 956,43 HV.

Analisando os gráficos obtidos nos ensaios de microdureza em conjunto com as imagens obtidas no MEV, pode-se afirmar que as regiões de elevada dureza coincidem com as espessuras de revestimento obtidas. Esse fato reforça a ideia de que o aumento da potência do laser resulta em maiores espessuras de revestimento. Porém, percebe-se que na amostra 5 os valores de microdureza obtidos na região do revestimento são menores que os valores obtidos nas outras amostras. Esse efeito ocorreu devido a diluição do WC sob o substrato de aço, ou seja, a partir de um determinado valor de potência do laser aplicado, a espessura do revestimento passa a ser tão grande que os valores de microdureza começam a ser menores.

Como apresentado na revisão bibliográfica, a dureza é o fator mais importante para garantir a resistência ao desgaste, porém deve-se evitar estruturas excessivamente frágeis. Dessa forma, apesar de apresentar o maior valor de microdureza, a amostra 1 apresenta uma espessura de revestimento muito pequena comparado às outras amostras, tendo maiores possibilidades de apresentar alguma falha por fragilidade da estrutura.

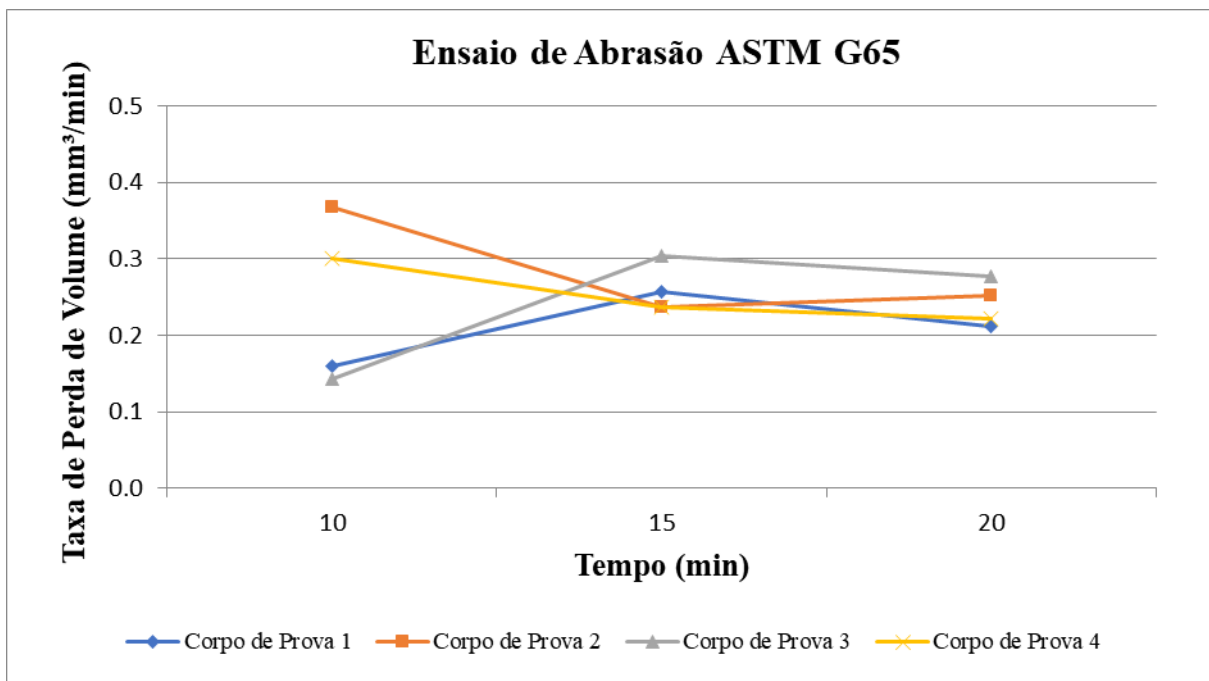
Entre as três amostras restantes (amostras 2, 3 e 4), a melhor resistência ao desgaste estará na amostra que apresentar maiores valores de microdureza e de espessura de revestimento. Sendo assim, tem-se a amostra 4 como a melhor amostra para resistência ao desgaste, por apresentar uma espessura de revestimento de 301,8  $\mu\text{m}$  e o maior valor médio de microdureza, sendo de 1308,43 HV. Além disso, a amostra 4 apresentou a menor quantidade de falhas na microestrutura.

### 4.3 Ensaio de Desgaste por Abrasão

Como apresentado na metodologia, o ensaio de desgaste por abrasão foi realizado em quatro corpos de prova de aço SAE 1020 revestido com WC e refundidos pelo melhor parâmetro do laser de fibra, no caso o quarto parâmetro (350 Watts de potência). Essa escolha se deve pelo motivo das demais amostras não apresentarem uma qualidade satisfatória de revestimento.

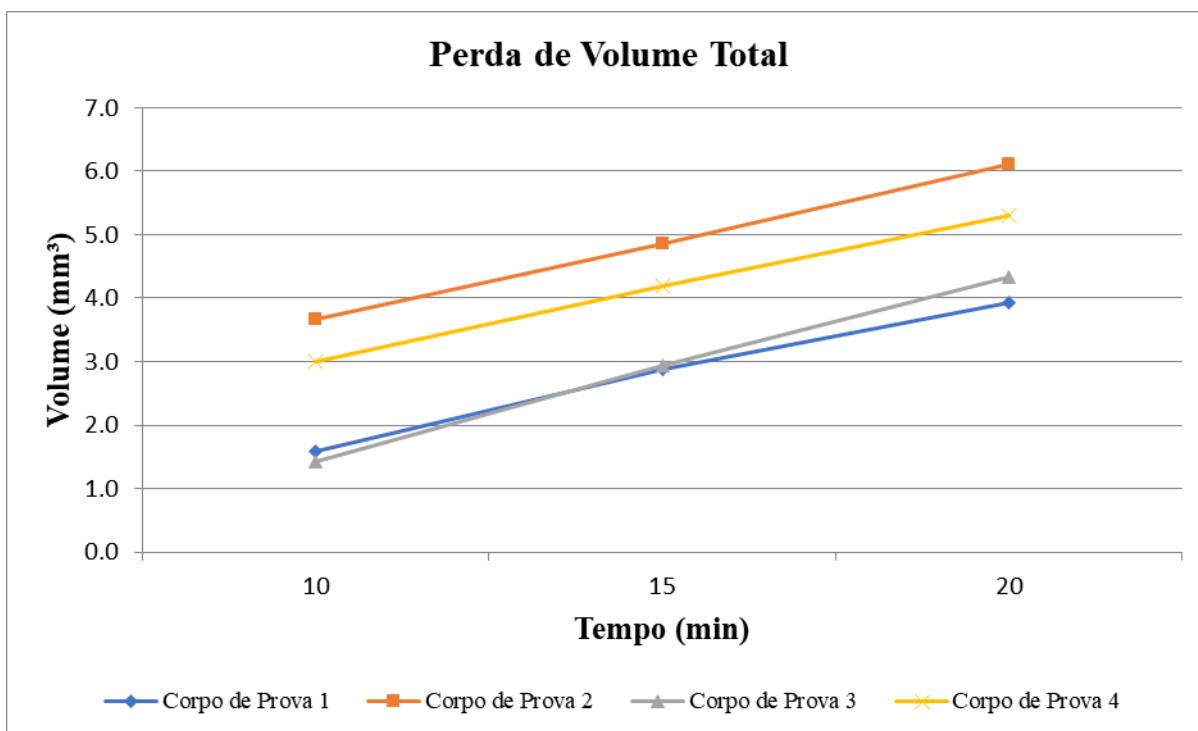
O teste foi realizado por um período de vinte minutos, registrando os valores de perda de volume aos dez, quinze e vinte minutos de ensaio. Foi utilizada uma carga de 130 N para pressionar os corpos de prova em direção à roda e a velocidade angular da roda foi de 200 r.p.m. Assim, a Figura 35 apresenta o gráfico comparativo dos valores de taxa de perda de volume obtidos nos quatro corpos de prova e a Figura 36 apresenta o gráfico comparativo dos valores de perda de volume total obtidos.

Figura 35 – Gráfico comparativo dos valores de taxa de perda de volume obtidos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 36 – Gráfico comparativo dos valores de perda de volume total obtidos.



Fonte: Aatoria própria (2019).

O maior valor de taxa de perda de volume obtido foi de  $0,3669 \text{ mm}^3/\text{min}$  no segundo corpo de prova, aos 10 minutos de ensaio e o menor valor foi de  $0,1427 \text{ mm}^3/\text{min}$  no terceiro corpo de prova, também aos 10 minutos de ensaio. Porém, ao decorrer do tempo, todos os corpos de prova tendem a apresentar um valor padrão de taxa de perda de volume, na faixa de  $0,2$  a  $0,3 \text{ mm}^3/\text{min}$ .

O valor médio de taxa de perda de volume obtido foi de  $0,2472 \text{ mm}^3/\text{min}$ , que se assemelha ao valor fornecido pela Rijeza Metalurgia para o WC-17Co sem aplicação de laser, que é de  $0,23 \text{ mm}^3/\text{min}$ , conforme apresentado na Figura 5, presente na seção 2. Apesar desse valor obtido ser um pouco maior que o fornecido pela Rijeza, ainda sim é um valor satisfatório para resistência ao desgaste por abrasão, considerando que o revestimento analisado não possui ligantes metálicos em sua composição.

Dessa forma, pode-se afirmar que o processo de refusão por laser de fibra realizado com 350 Watts de potência e velocidade de varredura de  $1200 \text{ mm}/\text{min}$ , garante a maior adesão do revestimento ao substrato e apresenta uma boa resistência ao desgaste por abrasão. Por fim, acredita-se que ao acrescentar ligantes metálicos a esse pó de WC utilizado, pode-se melhorar o desempenho em relação ao desgaste abrasivo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa seção são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

O presente estudo avaliou os efeitos do processo de refusão por laser de fibra Yb (Itérbio) em um aço SAE 1020 com revestimento superficial de WC (Carbeto de Tungstênio) depositado via HVOF. As microestruturas foram avaliadas a partir de análises metalográficas, os perfis de microdureza foram determinados e a resistência ao desgaste por abrasão do melhor parâmetro foi analisada. Com base nisso, pode-se concluir que:

- A aplicação do laser de fibra resultou na refusão das camadas de revestimento com o substrato, proporcionando a homogeneização da microestrutura e conseqüentemente melhorando a adesão do WC no aço SAE 1020. Apesar de todos os parâmetros apresentarem falhas como trincas, regiões de refusão incompleta ou poros na microestrutura, o parâmetro 4 (350 Watts de potência) apresentou em menor quantidade;
- Com o aumento da potência de aplicação do laser de fibra, as espessuras dos revestimentos são maiores, o que em um primeiro momento é bom, pois espessuras muito pequenas com elevada dureza podem resultar em uma estrutura frágil. Porém, a partir de um determinado valor de potência do laser, as espessuras de revestimento obtidas são tão grandes que os valores de microdureza começam a cair, devido a diluição do WC sob o substrato de aço;
- O parâmetro 4, que foi aplicado com 350 Watts de potência e velocidade de varredura de 1200 mm/min, apresentou os resultados mais satisfatórios nas análises metalográficas e nos ensaios de microdureza. Obteve-se uma espessura de revestimento de 301,8  $\mu\text{m}$  e o maior valor médio de microdureza de 1308,43 HV;
- Considerando que o revestimento analisado não possui ligantes metálicos em sua composição, o parâmetro 4 de aplicação do laser de fibra apresenta boa resistência ao desgaste por abrasão. Obteve-se um valor médio de taxa de perda de volume de 0,2472  $\text{mm}^3/\text{min}$ , que é um valor próximo aos valores fornecidos pela Rizeja Metalurgia para revestimentos de WC com ligantes metálicos na composição.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- Realizar o processo de refusão por laser de fibra com diferentes velocidades de varredura, tendo novos parâmetros para serem analisados e comparados;
- Realizar este mesmo estudo com revestimentos de WC-12Co, WC-17Co e WC-10Ni, a fim de determinar a importância dos ligantes metálicos para a resistência ao desgaste abrasivo;
- Analisar a resistência à corrosão desses revestimentos.

## REFERÊNCIAS

BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011, p. 82.

LUZ, G. **Aço SAE 1020 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 15 de Julho de 2019.

PANZIERA, R. C. **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. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016, p. 2-27.

RODRIGUES, P. H. E. **Estudo Tribológico do Revestimento de Stellite 6, Aspergido por HVOF Antes e Após Polimento, e do Substrato de Aço Inoxidável AISI 304**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2018, p. 1.

GEHRKE, G. A. **Revestimento de Roscas Helicoidais Agrícolas a Base de CrC Depositado via HVOF Posteriormente Irradiadas com Laser de Nd YAG e de CO2**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017, p. 1.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, Tratamentos Térmicos e Principais Tipos**. 7ª Ed. Ampliada e Revisada - São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005, p. 374-375.

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006, p. 6.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4ª Ed. Traduzido e revisado. Rio de Janeiro: LTC, 2013, p. 201-203.

KANDEVA, M.; VENCL, A.; KARASTOYANOV, D. **Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies**. ResearchGate, 2016, p. 27.

HYTTEL, M. W.; OLSSON, D. D.; REISEL, G.; BØTTIGER, J. **Comparison of a newly developed compression-twist abrasive wear test with the ASTM G65 test method**. Wear 307, Elsevier, 2013, p. 135.

KURODA, S.; KAWAKITA, J.; WATANABE, M.; KATANODA, H. **Warm spraying - a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles**. Science and Technology of Advanced Materials 9. IOP, 2008, p. 2.

ASM INTERNATIONAL. **Handbook of Thermal Spray Technology**. Edited by J. R. Davis; Prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee. ASM International, 2004, p. 5 e 11.

FLAME SPRAY TECHNOLOGIES. **HVOF - High Velocity Oxygen Fuel**. Disponível em: <<https://www.fst.nl/systems/hvof-high-velocity-oxygen-fuel-thermal-spray/>>. Acesso em: 16 de Julho de 2019.

AZIZPOUR, M. J.; TOLOUEI-RAD, M. **The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings**. Ceramics International 45, Elsevier, 2019, p. 13939.

AMIN, S.; PANCHAL, H. **A Review on Thermal Spray Coating Processes**. International Journal of Current trends in Engineering & Research (IJCTER). Volume 2, Issue 4, 2016, p. 561.

GONÇALVES, A. M. **Usinabilidade do Carbetto de Tungstênio no Torneamento com Ferramenta de Diamante**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009, p. 47.

GUTIÉRREZ, J. A. E. **Extração de Ligantes e Sinterização por Plasma de Metal Duro**. Tese. Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002, p. 5.

RIJEZA METALURGIA. **Data Sheet do Carboneto de Tungstênio: Revestimento Metálico**. Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/revestimentos/carboneto-de-tungstenio>>. Acesso em: 17 de Julho de 2019.

NERZ, J.; KUSHNER, B.; ROTOLICO, A. **Microstructural Evaluation of Tungsten Carbide-Cobalt Coatings**. Journal of Thermal Spray Technology (JTST). Volume 1, Issue 2, 1992, p. 147.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2<sup>nd</sup> Edition. Butterworth-Heinemann, 1983, p. 118.

SINGH, J. Review **Laser-beam and photon-assisted processed materials and their microstructures**. Journal of Materials Science, Volume 29, Issue 20, 1994, p. 5239-5240.

MORENO, G. R.; SILVA, B. L.; RIVA, R.; CHEUNG, N.; SPINELLI, J. E. **Aspectos da Refusão Superficial e Microdureza da Liga Eutéctica Sn-0,7%Cu**. 21<sup>o</sup> CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá – MT, 2014, p. 5843.

SILVA, L. V. **Estudos dos Mecanismos Envolvidos em Processos de Endurecimento Superficial a Laser de ligas a Base de Alumínio**. Dissertação. Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2011, p. 11.

PEREZ, J. M. R. **Refusão Superficial por Laser de Ligas Ti-Nb Sinterizadas**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Materiais e Processos de Fabricação. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2015, p. 5-15.



VERHAEGHE, G.; HILTON, P. **Battle of the Sources - Using a High-Power Yb-Fibre Laser for Welding Steel and Aluminium**. 58<sup>th</sup> Annual Assembly and International Conference of International Institute of Welding. Prague, Czech Republic, 2005, p. 7.

RIJEZA METALURGIA. **Revestimentos Aplicados por HVOF - Conceito e Benefícios – Galeria de Fotos**. Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/blog/revestimentos-aplicados-por-hvof-conceito-e-beneficios>>. Acesso em: 18 de Julho de 2019.

PAES, L. E. S.; PEREIRA, M.; PEREIRA, A. S. P.; BORHÓQUEZ, C. H. N.; WEINGAERTNER, W. L. **Power and Welding Speed Influence on Bead Quality for Overlapped Joint laser Welding**. Journal of Laser Applications 31, 2019, p. 3.

RIJEZA METALURGIA. **Desgaste por Abrasão (ASTM G65) - Como uma boa seleção de materiais pode aumentar a vida útil de peças em mais de 1000%?**. Disponível em: <<https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F10803%2F1464054096Ensaio+de+Abrasão+Rijeza.pdf>>. Acesso em: 19 de Julho de 2019.