

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO REVESTIMENTO DE CARBETO
DE TUNGSTÊNIO REFUNDIDO VIA LASER DE CO₂ APLICADO EM
AÇO AISI 1020**

ANTONIO GUILHERME RONZANI

Trabalho de Conclusão de Curso

Alegrete – RS

2017

ANTONIO GUILHERME RONZANI

**RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO REVESTIMENTO DE CARBETO
DE TUNGSTÊNIO REFUNDIDO VIA LASER DE CO₂ APLICADO EM
AÇO AISI 1020**

Trabalho de Conclusão de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial na obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira.

Coorientador: Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto.

Alegrete – RS

2017

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

R775r

Ronzani, Antonio Guilherme

Resistência à cavitação do revestimento de carbeto de tungstênio refundido
via laser de co2 aplicado em aço AISI 1020 / Antonio Guilherme Ronzani.

101 p.

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

"Orientação: Ana Claudia Costa de Oliveira".

1. Aspersão Térmica. 2. Laser de CO2. 3. Cavitação. I. Título.

ANTONIO GUILHERME RONZANI

**RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO REVESTIMENTO DE CARBETO
DE TUNGSTÊNIO REFUNDIDO VIA LASER DE CO₂ APLICADO EM
AÇO AISI 1020**

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

Orientador: Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira.

Coorientador: Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04, julho de 2017.

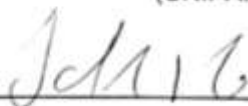
Banca examinadora:



Prof. (a): Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira

Orientadora

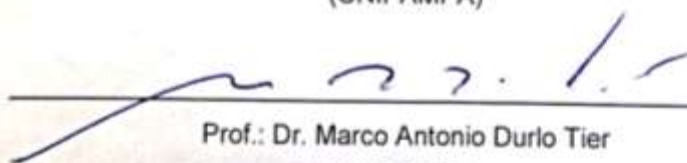
(UNIPAMPA)



Prof.: Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto

Coorientador

(UNIPAMPA)



Prof.: Dr. Marco Antonio Durlo Tier

(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho àqueles que me inspiram a ser quem sou hoje, minha mãe Dalva e meu pai Antonio.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer especialmente à minha professora e orientadora Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira pela confiança em mim depositada e pelo *network* criado ao longo da pesquisa, coordenando todas as etapas deste trabalho. Ao Professor Dr. Adriano Roberto Carotenuto por sempre estar à disposição no diálogo aberto sobre máquinas de fluído e testes de cavitação.

Ao Sr. Darlan Geremia, diretor da empresa Rijeza Metalurgia, no fornecimento de matéria prima, como o pó de Carbetto de Tungstênio, técnicas de aspersão térmica via HVOF e na disponibilidade de suporte técnico através de seus funcionários e uso de suas instalações fabris.

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv), representado pela Dr.^a Silvelene Alessandra da Silva e Dr. Getúlio de Vasconcelos, que me auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa através do fornecimento de equipamentos no tratamento superficial a Laser e troca de informações pertinentes.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), representado por André Contin e Maria Lucia Brison, pela cooperação nas análises de MEV/FEG e rugosidades superficiais das amostras.

Ao campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Ponta Grossa, representado com excelência pelo Professor Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, no fornecimento do equipamento de cavitação por vibração ultrassônica.

Agradeço também aos meus pais Antonio e Dalva, que são o alicerce de todas as minhas conquistas e também às minhas irmãs Ana e Maria que carrego junto em meus pensamentos e em meu peito. Essas pessoas serão eternas em minha breve existência.

Por último, mas não menos importante agradeço a toda a minha família, a melhor do mundo, sem sombra de dúvidas.

“Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura”.

Autor Desconhecido

RESUMO

Em engenharia mecânica são grandes as preocupações com a cavitação, assim como a abrasão de sedimentos transportados pelo fluido em instalações hidráulicas, bombas e turbinas, sobretudo devido aos prejuízos que estes fenômenos podem causar nas estações elevatórias e usinas hidrelétricas. Estudam-se diversas propostas para a eliminação ou redução deste problema, desde o redesign do componente e sua instalação, até a aplicação de revestimentos superficiais com materiais de alta tecnologia. O objetivo geral deste trabalho é fazer a caracterização e análise tribológica de cavitação em amostras de aço AISI 1020, revestidas por aspensão térmica com Carbetto de Tungstênio e posteriormente irradiadas via Laser de CO₂. As amostras foram analisadas por MEV/EDS, Microscopia Ótica, Rugosímetro, Micro Durômetro e teste de resistência à cavitação. Os resultados foram uma ligação metalúrgica entre revestimento e substrato, além de uma densificação e endurecimento superficial do revestimento devido à refusão via Laser de CO₂; a análise por EDS do substrato e seu revestimento, mostram a evaporação de elementos mais voláteis como Cromo e Cobalto no momento da irradiação do Laser e confirma a difusão de elementos químicos do revestimento no substrato; ocorreu a diminuição da rugosidade superficial após a aspensão térmica. O teste de cavitação comprova uma resistência à erosão, mostrando-se superior a materiais comerciais.

Palavras Chave: Aspensão térmica; Processamento a Laser de Materiais; Cavitação; aço AISI 1020.

ABSTRACT

Mechanical engineering is concerned with cavitation as well as the abrasion of sediments carried by the fluid in hydraulic installations, pumps and turbines, mainly due to the damages that these phenomena can cause in the elevators and hydroelectric plants. Proposals for the elimination or reduction of this problem are studied, from the redesign of the component and its installation, to the application of surface coatings with high technology materials. The main objective of this work is tribological analysis of cavitation in AISI 1020 steel samples, coated by thermal spraying with Tungsten Carbide and later irradiated by CO₂ Laser. The samples were analyzed by SEM/EDS, Optical Microscopy, Rugosimeter, Vickers Microindentation hardness and cavitation resistance. The results were a metallurgical bond between coating and substrate, in addition to densification and surface hardening of the coating due to CO₂ laser remelting; The EDS analysis of the substrate and its coating shows the evaporation of more volatile elements such as Chromium and Cobalt at the time of Laser irradiation, and confirms the diffusion of chemical elements of the coating on the substrate; There is a decrease in surface roughness after thermal spraying coating. The cavitation test, shows that samples are resistant to erosion cavitation, proof to be superior to commercial materials.

Keywords: Thermal Spraying; Laser Processing of Materials; Cavitation; AISI 1020 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escopo do Trabalho	4
Figura 2 – Tipos de rotores. (a) Tipo fechado; (b) Tipo aberto	6
Figura 3 – Distribuição de pressão ao longo de uma turbobomba. Difusor Caracol....	7
Figura 4 – Estado Metafísico da Água	10
Figura 5 – Ciclo de cavitação por ondas de choque.....	11
Figura 6 – Representação esquemática de uma bolha de cavitação	12
Figura 7 – Séries do desenvolvimento do micro jato.....	13
Figura 8 – Superfície porosa causada por cavitação.	15
Figura 9 – Rotor de bomba centrífuga danificada por cavitação	15
Figura 10 – Aceleração do desgaste erosivo em bombas submetida a sólidos suspensos. .	16
Figura 11 – Esquema de Testes de Cavitação Laboratoriais	18
Figura 12 – a)Taxa de perda em massa vs. Tempo de exposição e b)Estágios Característicos da Taxa de Erosão vs. Tempo de Exposição.	19
Figura 13 – Crescimento da demanda industrial pela aspensão térmica.....	20
Figura 14 – Diagrama dos tipos de processo de aspensão térmica.....	21
Figura 15 – (a) Tipos de pistola de aspensão; (b) Tipos de componentes aspergidos	22
Figura 16 – Desenho de três gerações de sistemas de HVOF	23
Figura 17 – Esquema de funcionamento de pistola HVOF	24
Figura 18 – Ampliação da região de impacto da partícula contra o substrato	25
Figura 19 – Visualização do Aço Carbono SAE 1020	28
Figura 20 – Esquema de ancoragem mecânica na superfície rugosa do substrato ..	29
Figura 21 – Interação da irradiação com a matéria	31
Figura 22 – Setor de Processamento de materiais a Laser	33
Figura 23 – Laser Evolution 125.....	34

Figura 24 – Intensidade na irradiação do feixe de Laser.....	35
Figura 25 – Exemplos de sobreposição do feixe de Laser	36
Figura 26 – Síntese de desenvolvimento da pesquisa	37
Figura 27 – Fluxograma da preparação das amostras.....	37
Figura 28 – Amostra do substrato em Aço AISI 1020	38
Figura 29 – Abrasivo Óxido de Alumínio	39
Figura 30 – Superfície jateada com granalha de alumina	40
Figura 31 – Amostra de (Carbeto de Tungstênio 10%CoCr) em pó.....	41
Figura 32 – Revestimento por aspersão térmica HVOF	42
Figura 33 – Bancada de irradiação, Laser de CO ₂	43
Figura 34 – Tipo de feixe de Laser no tratamento das amostras aspergidas por HVOF .	44
Figura 35 – MEV da Universidade Federal do Pampa/ Alegrete.	47
Figura 36 – MEV/FEG do INPE/ São José dos Campos.....	47
Figura 37 – Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	48
Figura 38 – Microscópio ótico utilizado	49
Figura 39 – Cortadeira Metalográfica de Precisão IsoMet 5000.....	50
Figura 40 – a) Sequência granulométrica; b) Lixadeira automática; c) Secador	51
Figura 41 – Aparelho de limpeza por vibração ultrassônica.....	52
Figura 42 – Perfilômetro Veeco NT1100 (<i>Optical Profiling System</i>).....	53
Figura 43 – Microdurômetro Buehler Tukon 1102	54
Figura 44 – Visão ocular do microdurômetro, com magnitude de 500X.....	54
Figura 45 – Esquema de endentadura Vickers e formato de impressão	55
Figura 46 – Exemplo de indentação Vickers distorcida (400X)	56
Figura 47 – Esquema de teste de microdureza.....	57
Figura 48 – Sonotrodo utilizado.....	58
Figura 49 – Diagrama do Procedimento Operacional	60

Figura 50 – Ajuste dos Parâmetros. Equipamento de Cavitação	61
Figura 51 – Espessura Média de Camada (35µm). Revestimento Após Refusão	63
Figura 52 – Interface Antes da Aplicação do Laser.....	64
Figura 53 – EDS do Substrato Aço AISI 1020.....	64
Figura 54 – Espectro do Revestimento Com WC.....	65
Figura 55 – Espectro da Interface Revestimento/Substrato	66
Figura 56 – Espectro do Aço AISI 1020	67
Figura 57 – Partículas de Carbetto de Tungstênio.....	67
Figura 58 – Aspecto superficial da partícula de WC.....	68
Figura 59 – Ampliação 100X Antes e Após a refusão via Laser.....	69
Figura 60 – <i>Line Scan</i> do Revestimento Refundido por Laser.. ..	70
Figura 61 – Superfície Jateada Com Granalha de Alumina	71
Figura 62 – Superfície Aspergida com HVOF	72
Figura 63 – Rugosidade Tridimensional (Superfície Aspergida por HVOF)	73
Figura 64 – Gráfico de Dureza Vickers (HVOF)	74
Figura 65 – Gráfico de Dureza Vickers (HVOF + Laser)	75
Figura 66 – Gráfico Comparativo de Dureza por Microindentação.....	76
Figura 67 – Teste de Cavitação	77
Figura 68 – Perda de Massa Acumulada	78
Figura 69 – Profundidade Média de Erosão [MDE]	78
Figura 70 – Perda Volumétrica Acumulada.....	79
Figura 71 – Perda de Massa Por Área	79
Figura 72 – Resistência à Cavitação Entre as Amostras Testadas e Outros Materiais ..	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à cavitação para diferentes ligas de aço.....	17
Tabela 2 – Propriedades de alguns materiais e fator de dificuldade de fusão.	26
Tabela 3 – Propriedades do Carbetto de Tungstênio.....	27
Tabela 4 – Tolerância química do Aço AISI 1020	28
Tabela 5 – Valores de Ra para Comprimentos mínimos de Amostragem.....	30
Tabela 6 – Parâmetro utilizado na irradiação a Laser de CO ₂	45
Tabela 7 – Especificações Técnicas de Teste	62
Tabela 8 – EDS do Revestimento Com WC.....	65
Tabela 9 – EDS da Interface Revestimento/Substrato	66
Tabela 10 – EDS do Substrato AISI 1020	66
Tabela 11 – Parâmetros de Rugosidade (Superfície Jateada Com Al ₂ O ₃).....	71
Tabela 12 – Parâmetros de Rugosidade (Superfície Aspergida com HVOF).....	73
Tabela 13 – Comparação Entre o Material Estudado e outros Materiais	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASM – *American Society of Materials*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

AWS – *American Welding Society*

CERMET – Material compósito, extremamente resistente ao calor, obtido a partir da mixagem, prensagem e aglomeração de metal com cerâmica

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

Co - Cobalto

CO₂ – Dióxido de Carbono (Gás Carbônico)

Cr – Cromo

DEP. – Departamento

DFM (cal g⁻¹) – Fator de Dificuldade de Fusão

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

HV – *Vickers Hardness* (Dureza Vickers)

HVOF – *High Velocity Oxygen Fuel*

IEAv – Instituto de Estudos Avançados

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISO – *International Organization for Standardization*

MDE (µm) – *Mean Deph of Erosion* (Taxa Média de Erosão)

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MEV/FEG – Microscópio eletrônico de varredura com fonte de emissão de campo

NBR – Norma Brasileira

Nd:YAG – Laser de Neodímio: Ítrio-alumínio-granada

NPSH (mca) – *Net Positive Suction Head* (Saldo Positivo de Sucção)

PPP – Pulso Por Polegada

R_a (μm) – Rugosidade Média. Parâmetro que determinado em função da linha média do perfil de rugosidade.

R_{dq} – Inclinação Média Quadrática do Perfil. Valores pequenos deste parâmetro indica superfície apropriada para reflexão da luz.

R_{ku} – Fator de Achatamento (*Kurtosis*).

RMS – *Root Mean Square* (Valor Eficaz). Medida estatística da magnitude de uma quantidade variável.

R_p (μm) – Altura Máxima do Pico do Perfil. Distância do pico máximo à linha média.

R_q (μm) – Rugosidade Quadrática Média (RMS). Acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média.

RS – Rio Grande do Sul

R_{sk} – Fator de Assimetria (*Skewness*).

R_{sm} (μm) – Largura Média de um Elemento do Perfil.

R_t (μm) – Rugosidade Máxima. Definido como o maior valor das rugosidades parciais em um determinado percurso de medição.

R_v (μm) – Profundidade Máxima do Vale do Perfil. Distância do vale mais profundo à linha média.

R_z (μm) – Rugosidade Total. Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, independente dos valores de rugosidade parcial.

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SIS – Swedish Standards Institute

Ti₆Al₄V – Titânio₆Alumínio₄Vanádio (Liga de Titânio – UNS R56400)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

UV – Ultravioleta

WC – Carbetto de Tungstênio

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

V (m s^{-1}) – Velocidade de escoamento

ρ (kg m^{-3}) – Peso Específico

P (Pa) – Pressão do fluido

g (m s^{-2}) – Aceleração gravitacional

h (m) – Altura da linha de referência

$Z_{0/1}$ (m) – Altura inicial/final da linha de referência

$P_{0/1}$ (Pa) – Pressão inicial/final da linha de corrente

$V_{0/1}$ (m s^{-1}) – Velocidade inicial/final da linha de corrente

$P_B(t)$ (Pa) – Pressão interna à bolha em função do tempo

$P_\infty(t)$ (Pa) – Pressão externa a bolha em função do tempo

ρ_L (kg m^{-3}) – Densidade do fluido em torno da bolha

$R(t)$ (m) – Raio da bolha em função do tempo

ν_L ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) – Viscosidade cinemática do líquido circundante (cte.)

S (N m^{-1}) – Tensão superficial da bolha

ΔH_m (cal cm^{-3}) – Calor Latente

Z (m) – Profundidade

β – Coeficiente Térmico

λ (μm) – Comprimento de Onda do Laser

t_i (s) – Tempo de irradiação com o Laser

α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) – Difusividade térmica do material

k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) – Condutividade térmica

C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) – Calor Específico do Material

\emptyset_f (mm) – Diâmetro do foco

v (mm s⁻¹) – Velocidade de aplicação do Laser

L (gf) – Carga em grama-força

d (μm) – Comprimento da diagonal da endentadura

m (kg) – Massa perdida por cavitação

A_s (mm²) – Área da ponteira vibratória

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Máquinas Hidráulicas.....	5
2.1.1	<i>Bombas Hidráulicas</i>	6
2.2	Cavitação.....	8
2.2.1	<i>Conceitos Básicos</i>	8
2.2.2	<i>Explicação Física do Fenômeno</i>	9
2.2.3	<i>Consequências da Cavitação em Máquinas de Fluido</i>	14
2.3	Aspersão Térmica.....	20
2.3.1	<i>High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)</i>	22
2.3.2	<i>Carbeto de Tungstênio Como Elemento de Aspersão</i>	25
2.3.3	<i>Substrato Metálico AISI 1020</i>	28
2.4	Tratamento de Superfícies por Laser em Metais	30
2.4.1	<i>Interação da Radiação Com a Matéria</i>	31
2.5	Laser de CO ₂	33
2.5.1	<i>Potência</i>	34
2.5.2	<i>Velocidade de Varredura</i>	35
2.5.3	<i>Resolução</i>	35
2.5.4	<i>Tempo de Interação</i>	36
2.5.5	<i>Sentido de Aplicação</i>	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	Substrato Aço AISI 1020.....	38
3.2	Preparação da Superfície por Jateamento de Alumina.....	38
3.3	Revestimento com Carbeto de Tungstênio.....	40
3.4	Aspersão Térmica Por HVOF	41
3.5	Refusão do Revestimento a Laser CO ₂	42
3.6	MEV/FEG e Análise Morfológica de Componentes	46

3.7	Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	48
3.8	Microscopia Ótica	49
3.9	Rugosidade Superficial	52
3.10	Dureza Por Microindentação	53
3.11	Cavitação Por Ultrassom	58
4	RESULTADOS	63
4.1	Análises Microestruturais.....	63
4.1.1	<i>Caracterização do Revestimento de WC e Substrato AISI 1020.....</i>	<i>64</i>
4.1.2	<i>Morfologia do Pó Aspergido (WC)</i>	<i>67</i>
4.1.3	<i>Microscopia Ótica</i>	<i>69</i>
4.1.4	<i>Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....</i>	<i>69</i>
4.1.5	<i>Perfilometria Superficial</i>	<i>70</i>
4.2	Dureza Por Microindentação	74
4.3	Cavitação Por Ultrassom	76
4.3.1	<i>Comparativo de Resistência à Cavitação Entre as Amostras.....</i>	<i>77</i>
4.3.2	<i>Comparação de Resistência à Cavitação Entre Materiais</i>	<i>80</i>
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
6	TRABALHOS FUTUROS.....	83
7	REFERÊNCIAS	84
8	APÊNDICES	89
9	ANEXOS.....	94

1 INTRODUÇÃO

A engenharia moderna difere-se muito de seus primórdios, principalmente pela globalização e descoberta de novas técnicas/materiais, que tornam o cenário industrial cada vez mais competitivo, buscando sempre alternativas de bom desempenho e economicamente viáveis.

Cavitação é um fenômeno físico decorrente da troca de estado do fluido de trabalho (líquido para gasoso) a baixas pressões, formando bolhas de gás que se colapsam contra a superfície, fazendo com que a vida de diversos equipamentos mecânicos seja reduzida significativamente devido a altas tensões geradas nos pontos de concentração do fenômeno. Entre as consequências de máquinas operando sob cavitação, cita-se a erosão como principal causa de paradas para manutenção das mesmas. Estudam-se diversas propostas para a eliminação ou redução deste problema, desde o *redesign* do componente e suas instalações, processo de alto investimento e vagaroso, até a aplicação de revestimentos superficiais com materiais de alta tecnologia, também conhecida como *Surface Engineering*.

Há várias maneiras de aplicar revestimentos em componentes, porém a técnica que apresenta a maior evolução nos últimos anos é o processo de aspersão térmica, onde substâncias propelidas são depositadas em estado fundido ou semifundido no substrato preparado. Neste âmbito, a utilização de técnicas de aspersão térmica tem o objetivo de formar uma fina camada, com materiais de alta tecnologia e boas propriedades mecânicas, em peças que sofrem com a ação de esforços de engenharia, protegendo a integridade do componente revestido, mesmo quando seu núcleo é formado por um material de baixo custo e de propriedades abaixo dos limites requeridos pelo projeto mecânico.

Atualmente consegue-se uma ligação física entre a camada aspergida de Carbetto de Tungstênio e o substrato, utilizando o método *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) de deposição, que é posteriormente processada por um feixe de Laser de CO₂, para refundir o material revestido, formando uma ligação metalúrgica e química entre revestimento/substrato, aumentando a coesão entre ambos e uma melhora das propriedades fisicoquímicas do revestimento aspergido.

1.1 Justificativa

Apesar do grande desenvolvimento tecnológico das últimas décadas na área de Engenharia de superfície em países desenvolvidos e emergentes, no que diz respeito a revestimentos aspergidos termicamente e seus enormes benefícios econômicos e técnicos, o Brasil continua sendo um país subdesenvolvido de uma forma geral no setor industrial, produzindo em sua base, principalmente produtos altamente padronizados e de baixo valor agregado (commodities). Poucas são as empresas nacionais que trabalham com a tecnologia de aspersão térmica, sendo que a procura aumenta a cada ano, fazendo deste um mercado emergente a ser explorado.

A cavitação é um fenômeno físico que traz muitos prejuízos ao setor de bombas hidráulicas, principalmente por causar erosão em regiões de colapso das microbolhas cavitadas. Nas aplicações onde este fenômeno não possa ser evitado, há a necessidade de proteger os componentes da ação erosiva que a cavitação causa, sendo uma das maneiras a engenharia de superfície, mais especificamente a aplicação de uma camada resistente ao desgaste. O Carbetto de Tungstênio (WC) é altamente recomendado em aplicações de abrasão e erosão devido a suas características de alta dureza mecânica e resistência ao desgaste, sendo comumente utilizado em revestimentos aspergidos termicamente através do método HVOF.

Apesar da alta dureza, o WC é frágil, facilitando a formação de micro trincas que acabam por descamar o revestimento ao longo do tempo. Com a finalidade de aumentar a adesão entre a camada e o substrato, o processamento a Laser de superfícies revestidas é uma área de conhecimento pouco estudada no Brasil, sendo que alguns dos benefícios da aplicação de Laser de CO₂ é elevar a dureza e tenacidade dos componentes submetidos ao feixe, criar tensões residuais compressivas na região de aplicação e criar uma ligação metalúrgica entre a interface revestimento-substrato, procurando aumentar a vida útil da camada aspergida.

1.2 Objetivos

A seguir são descritos os objetivos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Análise tribológica de cavitação em amostras revestidas por aspensão térmica via HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), que passaram por um tratamento a Laser de CO₂.

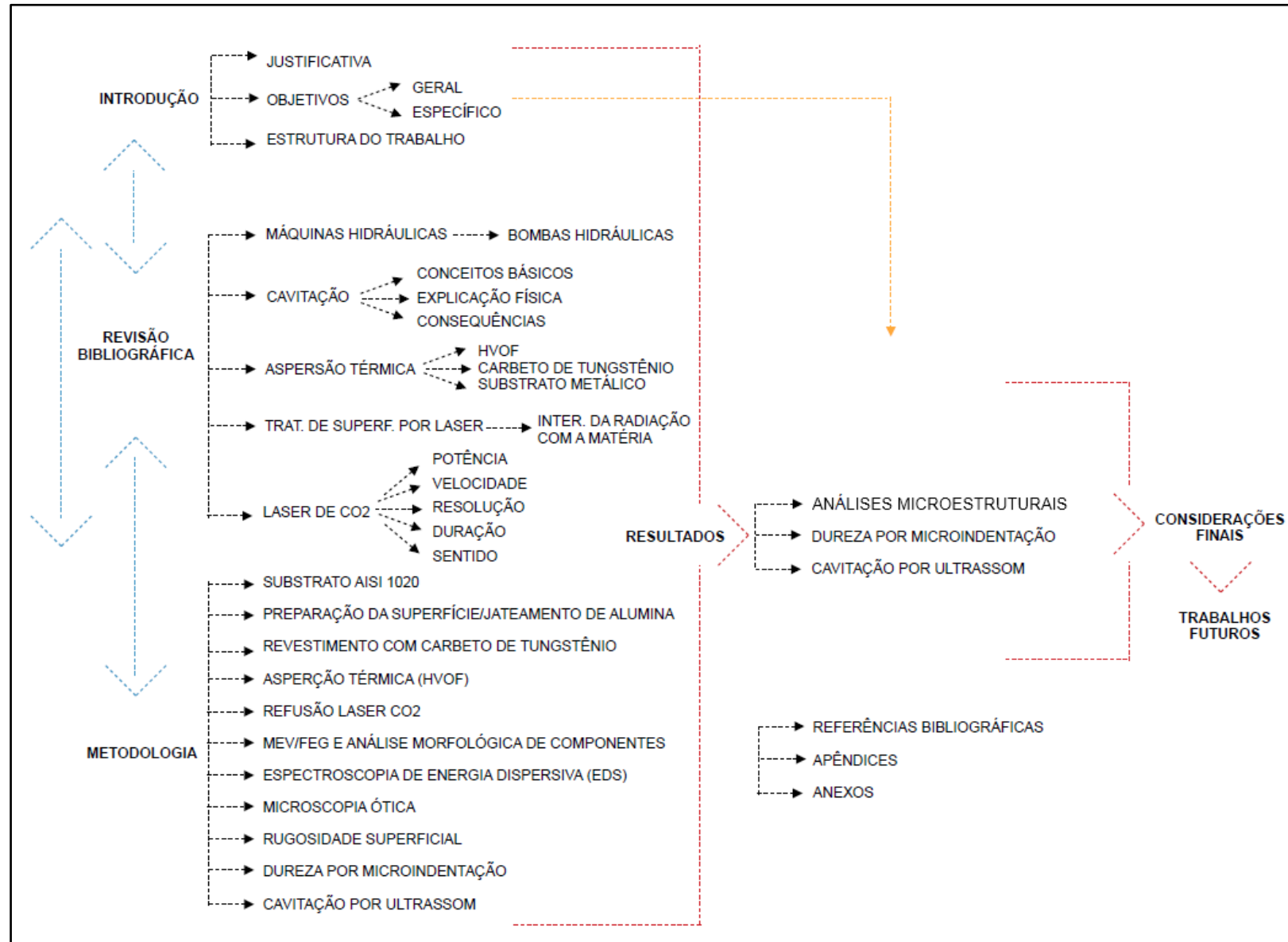
1.2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Caracterização do revestimento e substrato das amostras utilizadas;
- ❖ Espectroscopia de Energia Dispersiva na interface revestimento/substrato;
- ❖ Análise topográfica da superfície com e sem revestimento de WC, através da NBR 6405;
- ❖ Testes de dureza Vickers por microindentação;
- ❖ Teste de desgaste por cavitação ultrassônica, segundo a norma ASTM G32.

1.3 Estrutura do Trabalho

Segue na Figura 1 a dinâmica de desenvolvimento do trabalho e sua estrutura:

Figura 1 – Escopo do Trabalho



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará partes importantes no entendimento e desenvolvimento do estudo, sendo que o conhecimento a seguir está dividido em subseções da revisão bibliográfica.

2.1 Máquinas Hidráulicas

De uma forma geral máquinas hidráulicas podem ser classificadas de três formas de acordo com a transformação da energia do fluxo. Máquinas Motrizes; Máquinas mistas e Máquinas geratrizes ou operatrizes (MACINTYRE, 2010).

a) Máquinas motrizes

São máquinas que convertem energia hidráulica em trabalho mecânico. Comumente são aplicadas em geradores elétricos.

- Turbinas Hidráulicas, por onde o escoamento da água se dá em canais formados por pás hidrodinâmicas, dispostas em torno de um eixo móvel (rotor). Estas turbinas têm por objetivo geral, maximizar a captação da energia cinética do escoamento. Alguns dos modelos mais empregados de turbinas hidráulicas são a Francis; Propeller; Kaplan; Pelton; Dériaz.

- Rodas d'água, nas quais o fluxo é direcionado a cubas, que desenvolvem o torque de arranque desta máquina através do peso específico da água e sua velocidade.

b) Máquinas geratrizes

É cedida energia mecânica ao fluxo, geralmente por uma máquina motriz, na forma de energia potencial de pressão e cinética. Nesta categoria se encaixam as **bombas hidráulicas**. Pode-se ainda subdividir esta classe conforme o modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica.

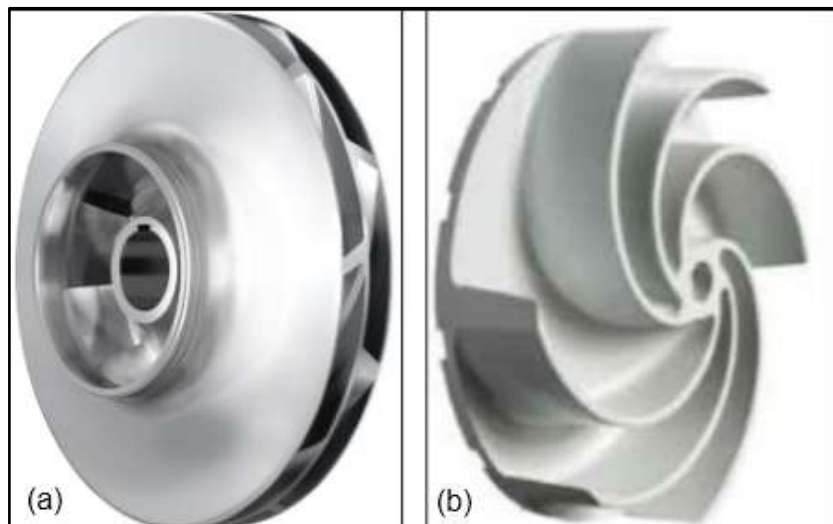
c) Máquinas mistas

São máquinas que modificam a energia que o fluxo possui sob uma forma em outra. Consiste nessa classe de máquinas os ejetores ou edutores, os pulsômetros, os carneiros hidráulicos, etc.

2.1.1 Bombas Hidráulicas

As bombas hidráulicas, também conhecidas por bombas hidrodinâmicas, são caracterizadas por apresentarem um componente rotatório dotado de pás, chamado rotor, que transfere a energia mecânica para o fluido, quando o mesmo é rotacionado. Existem dois tipos básicos de rotores, o aberto e o fechado, como segue na Figura 2:

Figura 2 – Tipos de rotores. (a) Tipo fechado; (b) Tipo aberto



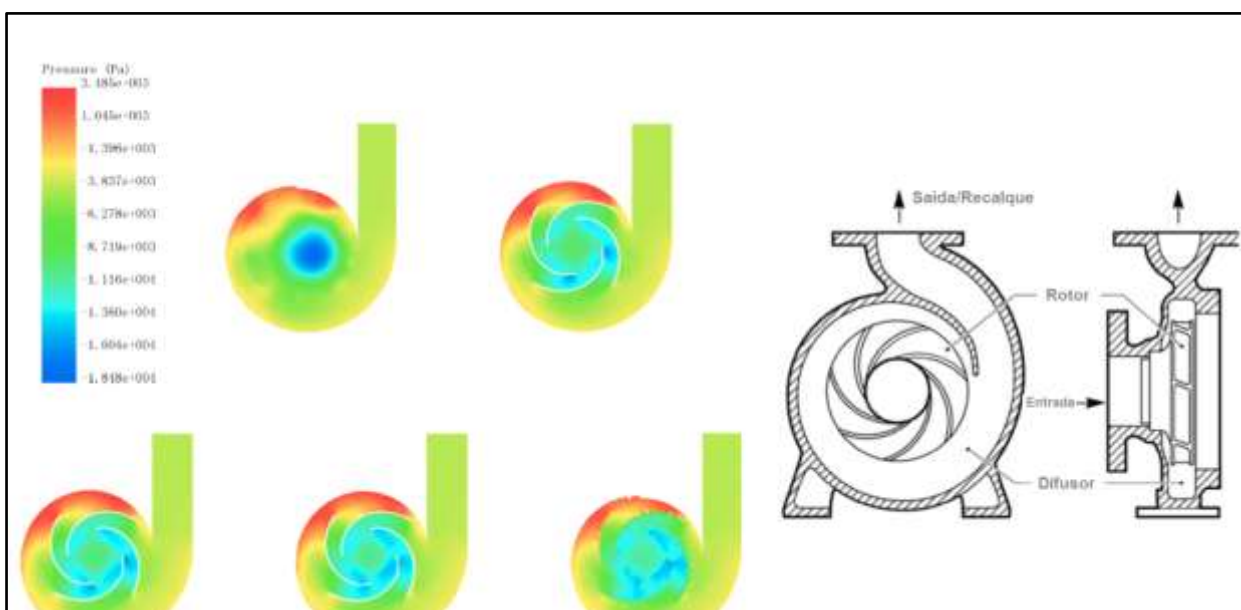
Fonte: (SULZER LTD, 2015).

Outra característica das bombas hidrodinâmicas é seu difusor, que segundo (MACINTYRE, 2010), faz a maior parte da transformação, da elevada energia cinética que sai do rotor em energia de pressão. Dependendo do tipo de

turbobomba, o difusor pode ser de tubo reto (em bombas axiais), ou de caixa (em forma de caracol).

A Figura 3, mostra uma simulação da distribuição de pressão ao longo de uma turbobomba com difusor caracol, com diferentes cortes de nível no plano radial.

Figura 3 – Distribuição de pressão ao longo de uma turbobomba. Difusor Caracol.



Fonte: Adaptado de (ALTAIR ENGINEERING, INC., 2015).

Percebe-se pela Figura 3, que há um grande gradiente de pressão entre a entrada e a saída do rotor. Este gradiente é influenciado principalmente pelo design e velocidade de rotação da máquina. Nota-se que uma zona de baixa pressão se encontra na entrada do rotor, onde há alta velocidade de fluxo, e que uma zona de alta pressão se concentra na saída do rotor em direção ao difusor, justamente onde há transformação de energia cinética em energia potencial de pressão.

Esta característica é de grande interesse de estudo, uma vez que há a possibilidade de ocorrência de fenômenos nocivos a vida útil de uma bomba, como é o caso da cavitação. Bombas e turbinas hidráulicas de grande porte, operam usualmente nos limites da cavitação, em parte devido à necessidade de se trabalhar com rotações, as mais elevadas possíveis, para conseguir-se reduzir os gastos com material e aumentar seu rendimento (HENN, 2006, p. 131).

2.2 Cavitação

É um fenômeno físico de gaseificação do líquido proveniente da relação metafísica entre a pressão e temperatura do meio fluido. Este fenômeno ocorre devido à forte depressão sofrida em uma linha de corrente que se acelera rapidamente, atingindo um valor de pressão crítico (P_{cr}) para uma dada temperatura, possibilitando a nucleação e crescimento de bolhas ou cavidades. Estas bolhas são transportadas pelo fluxo do fluido e, quando atingem regiões de pressões maiores que a pressão crítica, se tornam instáveis e colapsam violentamente (ASM, 2008, p. 1002 - 1017).

O resultado exaustivo deste processo pode causar a erosão de componentes expostos a este fenômeno, liberando partículas abrasivas quando se trabalha com revestimentos do tipo CERMET, neste caso o Carbetto de Tungstênio (WC).

2.2.1 Conceitos Básicos

Um exemplo simples da aceleração do fluido é o efeito Venturi, demonstrado em 1797 pelo físico Giovanni Battista **Venturi**. O efeito Venturi é explicado pelo princípio de Bernoulli, que descreve o comportamento de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente e traduz para os fluidos o princípio da conservação da energia. A equação que rege este princípio é mostrada a seguir pela Equação 1:

$$\frac{V^2\rho}{2} + P + \rho gh = Constante \quad (1)$$

Onde: V ($m\ s^{-1}$) – Velocidade de escoamento; ρ ($kg\ m^{-3}$) – Peso Específico; P (Pa) – Pressão do fluido; g ($m\ s^{-2}$) – Aceleração gravitacional e h (m) – Altura da linha de referência.

Esta equação mostra que em uma linha de corrente sem diferença significativa de altura, aumentando-se a velocidade do fluido de trabalho, a pressão deve cair, para manter a relação de conservação energética. Esta equação é válida apenas para escoamentos ideais, ou seja, invíscido, de vazão constante e incompressível ao longo de uma linha de corrente.

Em aplicações reais, temos que todo fluido possui na realidade algum tipo de atrito viscoso, assim é necessário adicionarmos à Equação 1 um termo de perda de energia (denominado perda de carga ou ΔH), resultando na Equação 2, aplicada em uma linha de corrente do ponto (0) ao (1):

$$Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + \Delta H \quad (2)$$

Onde: Z_0 (m) – Altura inicial da linha de referência; Z_1 (m) – Altura final da linha de referência; P_0 (Pa) – Pressão inicial da linha de corrente; P_1 (Pa) – Pressão final da linha de corrente; V_0 (m s⁻¹) – Velocidade inicial da linha de corrente e V_1 (m s⁻¹) – Velocidade final da linha de corrente.

No contexto das aplicações reais, tem-se em máquinas de fluxo, um longo histórico de problemas causados pela cavitação nos sistemas hidráulicos, para tanto faz-se necessário medidas preventivas, tanto no projeto da máquina como da instalação, que possam atenuar e evitar o seu aparecimento. Em instalações hidráulicas utiliza-se comumente um parâmetro denominado NPSH (*Net Positive Suction Head*) ou, Saldo Positivo de Altura de Sucção, em tradução livre, definido segundo (MACINTYRE, 2010, p. 209 - 211), como a energia total na sucção menos a energia correspondente à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento, onde a condição necessária para a não cavitação é o NPSH disponível pela máquina hidráulica na vazão de operação seja maior que o NPSH requerido. Assim temos pela Equação 3.

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (3)$$

2.2.2 Explicação Física do Fenômeno

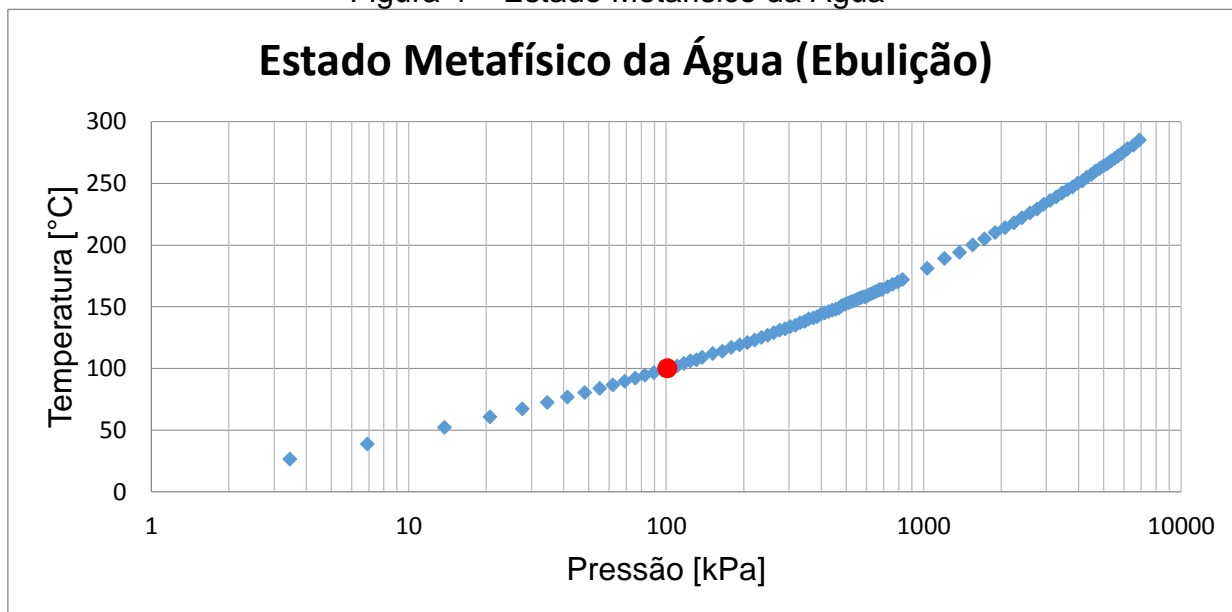
Segundo Henn (2006, p. 128 - 133), “a cavitação consiste na formação e subsequente colapso, de bolhas ou cavidades preenchidas, em grande parte por vapor do líquido”.

Entretanto Canavelis (1967) apud Henn (2006), propõe como definição mais geral de cavitação, “a formação de cavidades macroscópicas em um líquido, a partir

de núcleos gasosos microscópicos. Diz ainda da importância destes núcleos, constituídos de vapor do líquido, gás não dissolvido no líquido ou uma combinação de gás e vapor”. Segundo o autor a inexistência destes núcleos microscópicos, faria com que a aparição da cavitação só ocorresse caso houvesse forças localizadas da mesma ordem de grandeza das forças de ligação molecular.

O crescimento das bolhas de cavitação se dá pela vaporização do fluido, como resultado da relação metafísica entre pressão vs. temperatura, como exemplificado no gráfico da Figura 4. O ponto em vermelho deste gráfico representa a ebulição da água nas CNTP's, porém percebe-se que ao reduzir a pressão para 3,45kPa a água evapora a apenas 26,4°C e é justamente este fato que faz com que máquinas operando em baixas temperaturas, toma-se como exemplo 4°C ~ 30°C, gerem bolhas de cavitação.

Figura 4 – Estado Metafísico da Água



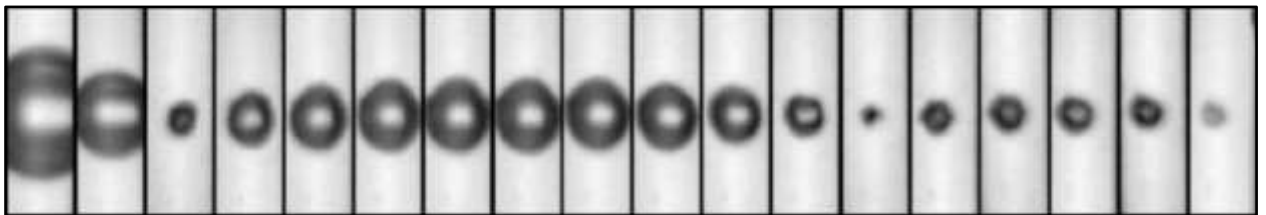
Fonte: Adaptado do site Engineering ToolBox.

Outro fator importante a ser analisado são os modos de ocorrência da cavitação (a) ou (b):

a) Ondas de impacto.

Em qualquer ponto do escoamento, sempre que a pressão local atingir valores iguais ou inferiores à pressão de vaporização do líquido na temperatura em que ele se encontra, ocorrerá cavitação. Na cavitação por ondas de impacto, o líquido na fronteira entre a bolha atinge altas velocidades, impedindo que o gás interno se condense, mesmo quando a bolha atinge dimensões ínfimas gerando elevadas pressões internas. No momento em que a pressão interna da cavitação atinge um valor crítico, uma frente de onda compressiva de elevada velocidade se forma na interface, fazendo o colapso e após o surgimento de uma nova cavidade, um pouco menor, porém de tamanho proporcional à energia dissipada no processo. Este ciclo é chamado como ondas de choque. Estas ondas produzem pressões localizadas de alta intensidade que podem ultrapassar teoricamente os 414Mpa de tensão e se formam com alta frequência, podendo causar fadiga de superfície (MAFTOUM, 2012) apud (WILLIAMS, 1997), (AKHATOV, LINDAU, *et al.*, 2001). Na Figura 5 pode-se notar o ciclo das ondas descrito anteriormente:

Figura 5 – Ciclo de cavitação por ondas de choque. O tempo entre fotos é de 4,4 μ s, com tempo de exposição de 1 μ s.



Fonte: (AKHATOV, LINDAU, *et al.*, 2001).

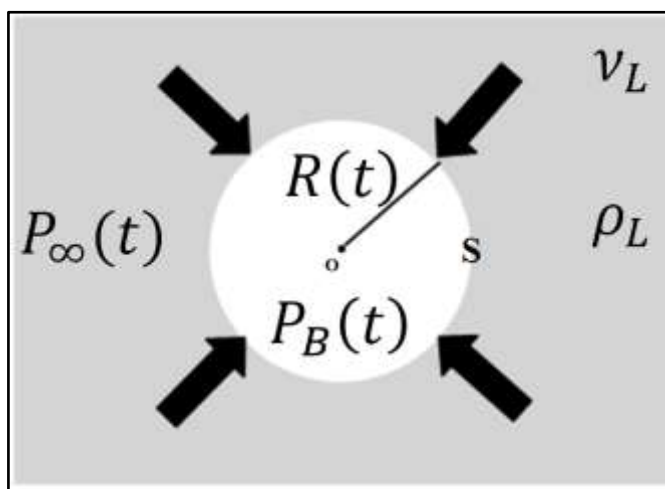
Uma característica interessante, analisada por especialistas do fenômeno, é a frequência com que as ondas de impacto se propagam, caracterizada pela Equação 4 de Rayleigh-Plesset, que descreve a dinâmica das bolhas:

$$\frac{P_B(t) - P_\infty(t)}{\rho_L} = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L} \quad (4)$$

Onde: $P_B(t)$ (Pa) – Pressão interna à bolha em função do tempo; $P_\infty(t)$ (Pa) – Pressão externa a bolha em função do tempo, não afetada por sua presença; ρ_L (kg m^{-3}) – Densidade do fluido em torno da bolha; $R(t)$ (m) – Raio da bolha em função do tempo; ν_L ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) – Viscosidade cinemática do líquido circundante, assumido como constante e S (N m^{-1}) – Tensão superficial da bolha.

A Equação 4 mostra as energias específicas, em J/kg, de pressão e de inércia (através da aceleração, velocidade, tensão superficial e viscosidade cinemática) da bolha cavitada, que continuará seu ciclo de expansão e colapso até que os termos da direita e esquerda desta equação entrem em equilíbrio, cessando o processo dinâmico das ondas de choque através da dissipação de sua energia. A terminologia desta equação é representada pela Figura 6 como segue:

Figura 6 – Representação esquemática de uma bolha de cavitação



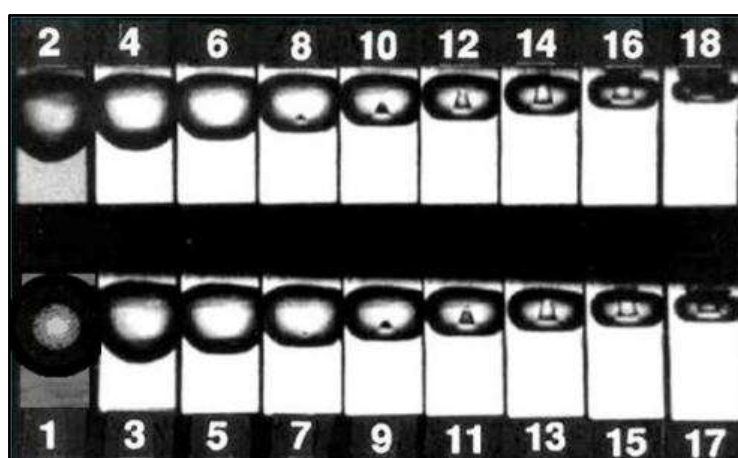
Fonte: Autoria própria.

b) Microjatos;

Durante os primeiros estágios da cavitação os núcleos gasosos crescem até se tornarem bolhas estáveis, que viajam ao longo das linhas de fluxo até regiões onde a pressão se eleva, geralmente devido à pressão de estagnação (aumento da pressão devido à condição de contorno de Dirichlet, onde a velocidade do escoamento junto a uma fronteira fixa é igual a zero, logo a baixa pressão localizada

no interior da bolha não tem mais energia para se sustentar em si e colapsa repentinamente através de uma frente de micro jato líquido, demonstrado no quadro 7 que atinge a superfície no quadro 14 da Figura 7 e continua a crescer até o limiar do extermínio da cavidade no quadro 18. A seguir pode-se ver na Figura 7 a sequência do nascimento de uma bolha cavitada em (1), até sua implosão:

Figura 7 – Séries do desenvolvimento do micro jato em uma bolha colapsando próximo a uma superfície sólida. O intervalo de tempo entre as fotos é de 2 μ s.



Fonte: (BRENNEN, 1995 apud RIBEIRO, 2007).

A velocidade com que esse micro jato penetra na bolha cavitada depende de vários fatores, sendo o principal a pressão. Comumente esta velocidade ultrapassa os 100m/s, gerando pressões que podem chegar a casa dos GPa (MAFTOUM, 2012), que superam o limite elástico da maioria dos materiais, como mostra a tabela do ANEXO A, retirada de (ASM MATERIALS INFORMATION, 2015).

O fenômeno físico da cavitação dura apenas alguns milissegundos, porém a alta frequência de incidência (de 10 a 180 kHz), (HENN, 2006), faz com que o material em contato com a implosão se rompa por fadiga, o principal mecanismo de desgaste por cavitação. Portanto faz-se necessário a observação do ANEXO B, referente ao fator de intensidade de tensões para modo de propagação de trincas do tipo (I). Observa-se na tabela do ANEXO B a baixa resistência à fratura do Carbetto de Tungstênio, $k_{IC} = 2 \sim 3.8$, por se tratar de um material cerâmico altamente duro, uma vez que k_{IC} é um parâmetro ligado às propriedades do material que segundo

Richman e Mcnaughton (1990) apud (PUKASIEWICZ, 2008), são importantes para a definição do comportamento à erosão por cavitação dos materiais. Este é o principal motivo para ter-se preocupação com a propagação de trincas causadas pela fadiga da cavitação em revestimentos cerâmicos, logo é necessário um cuidado especial no que diz respeito ao acabamento superficial de peças aspergidas com WC, cujo objetivo é evitar a nucleação de micro trincas através do deslizamento dos planos cristalinos superficiais.

Para alguns autores a presença de um certo grau de porosidade e micro trincas são benéficos, pois inibem o crescimento e propagação de trincas maiores nos revestimentos, (LIMA e TREVISAN, 2007).

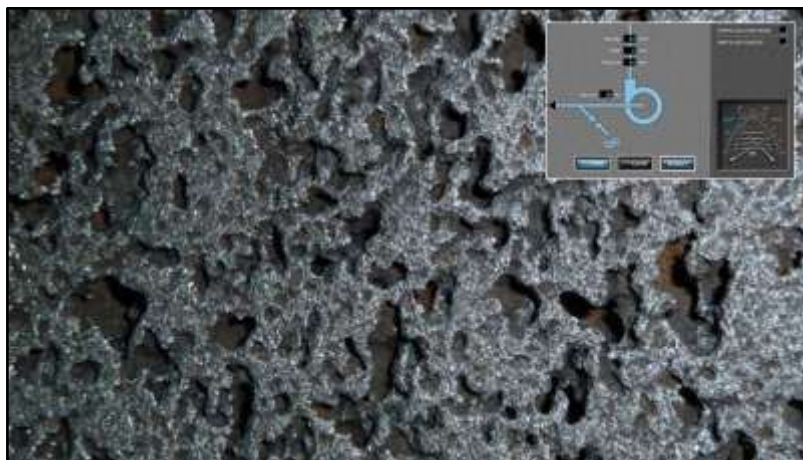
2.2.3 Consequências da Cavitação em Máquinas de Fluido

A cavitação envolve o início, crescimento isotérmico e implosão adiabática de bolhas; seu colapso tem o potencial de gerar temperaturas e pressões extremas, que podem atingir pressões de 10Gpa ou mais e alguns milhares de Kelvin em um curto intervalo de tempo (microsegundos) (SPRAY, 1999). Essas características fazem com que à cavitação tenha uma alta incidência de problemas provocados pela ruptura do material em exposição, fenômeno este conhecido também como “*cavitation pitting*” ou em tradução livre “Erosão por Cavitação”.

Devido à característica altamente turbulenta, nos estágios das pás de máquinas hidráulicas, pode-se imaginar como pequenas flutuações nas componentes tridimensionais do campo de velocidades do fluido, influenciam na localidade exata de colapso das bolhas de cavitação, apesar da região média ser a mesma (onde há aumento da pressão hidrodinâmica). A simultaneidade de implosões de várias bolhas de cavitação ao mesmo tempo, podem gerar sobreposições de tensões derivadas das ondas de impacto descritas pela Equação 4 de Rayleigh-Plesset, sendo justamente estes picos de tensão que causam a erosão de componentes em máquinas de fluido.

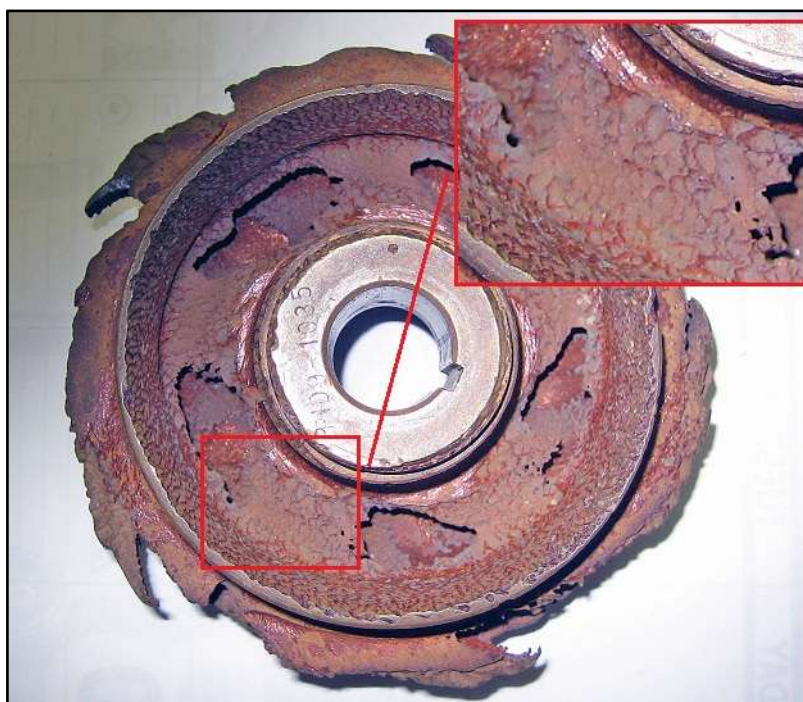
A seguir são mostradas na Figura 8 e Figura 9 a superfície porosa causada pelo fenômeno e um rotor de bomba de piscina que sofreu cavitação.

Figura 8 – Superfície porosa causada por cavitação.



Fonte: DREDGE VISION CONSULTANTS, 2015.

Figura 9 – Rotor de bomba centrífuga danificada por cavitação



Fonte: Adaptado de Inyo Pools, 2015.

A cavitação causa erosão no material, formando cavaco, e em alguns casos estas partículas viajam através da tubulação em altas velocidades, suspensas no fluído, para outras regiões do sistema. Tem-se então pelo princípio da conservação de quantidade de movimento, segundo (THE PHYSICS CLASSROOM, 2014), que a

energia acumulada cineticamente pela partícula é proporcional ao quadrado de sua velocidade e o movimento da mesma é diretamente proporcional à sua velocidade, em suma, velocidades altas e partículas pesadas como as de Carbetto de Tungstênio, representam altas quantidades de movimento que somado a sua pequena dimensão, causam grandes danos em seu impacto contra as paredes de tubulações e outros componentes de instalações hidráulicas.

Outra ocorrência inclui partículas abrasivas que migram para o interior do mecanismo hidráulico, como é o caso de bombas de sucção, podendo comprometer válvulas de escape, e outros componentes por efeito abrasivo entre o choque do cavaco formado pela cavitação e as paredes do componente. A Figura 10, extraída de (CAHABA MEDIA GROUP, 2015), mostra os efeitos de partículas abrasivas suspensas em fluido, em bombas analisadas pela empresa A.W. Chesterton Companies:

Figura 10 – Aceleração do desgaste erosivo em bombas submetida a sólidos suspensos.



Fonte: (CAHABA MEDIA GROUP, 2015).

Testes realizados na fábrica Escher Wyss, mostram a resistência à cavitação de diferentes ligas de aço em termos de perda de massa causada pelo fenômeno, mostrado na Tabela 1. Pesam-se inicialmente os corpos de prova de diferentes

materiais, colocando-os posteriormente em um difusor de cavitação, com pressão no difusor de 50kgf/cm² e velocidade da água de 100m/s. Após determinado tempo (ex.:150 horas), mede-se a perda de massa do material, que determina a resistência ao desgaste por cavitação (MACINTYRE, 2008, p. 208).

Tabela 1 – Resistência à cavitação para diferentes ligas de aço

Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Dureza Brinell (kgf/mm ²)	Perda de Material (g)
Aço Stg 4597	0,25	0,35	0,40				140	0,5155
Aço Stg L1	0,28	0,45	1,50				185	0,2456
Aço Stg Lh1	0,15	0,35	0,30	0,75	13,50		220	0,1751
Aço Stg Lh4 Mo	0,08	0,45	0,65	9,00	17,00	2,50	180	0,0953

Fonte: Escher Wyss apud Macintyre (2008).

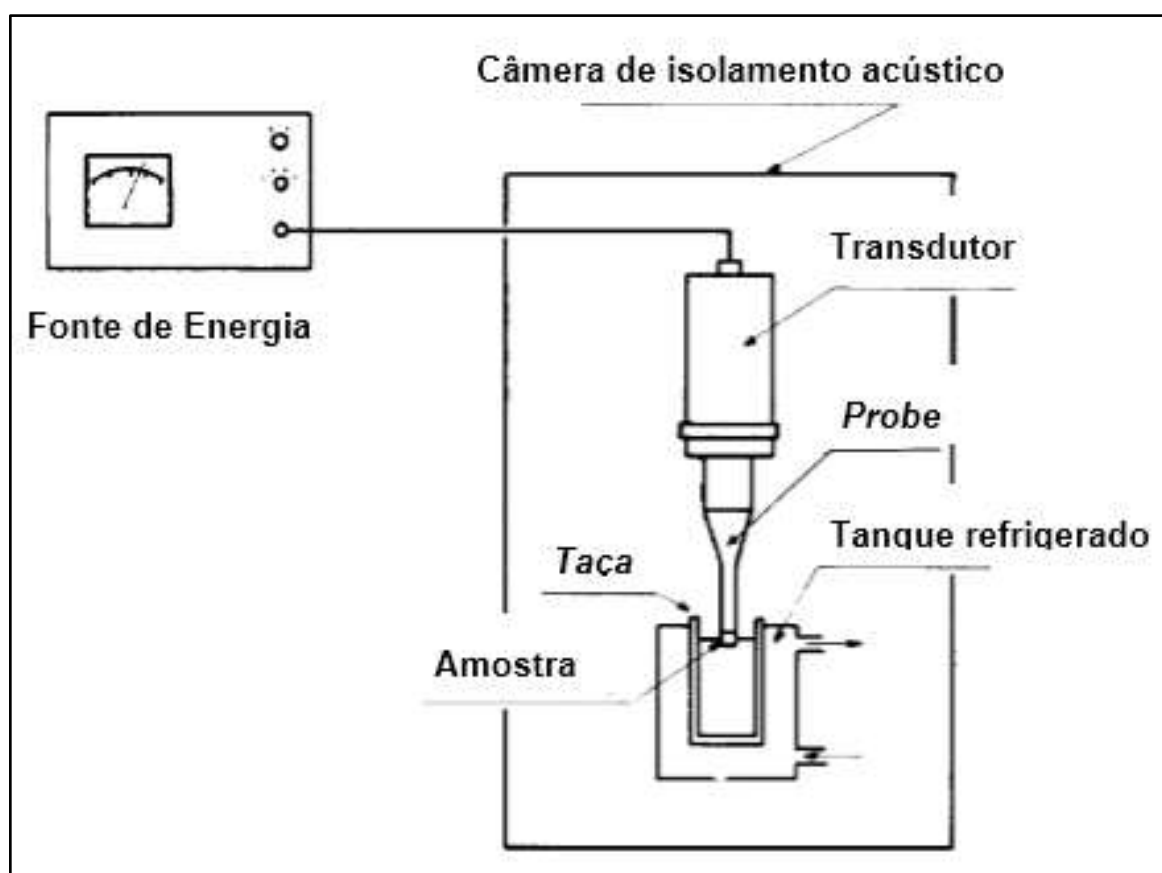
Observa-se que a liga de Aço Stg Lh₄ Mo tem uma resistência de 5,4 vezes maior em relação ao aço padrão Stg 45,97.

Para fins comparativos entre resistência à cavitação em diferentes materiais, criaram-se padrões de testes, dentre os quais, destaca-se a Norma ASTM G32. Esta norma possui diretrizes de como operar, fabricar e comparar amostras que foram submetidas à cavitação, criada em laboratório, por um transdutor ultrassônico.

Apesar do mecanismo da geração de bolhas de cavitação seja diferente entre máquinas hidráulicas e aparelhos laboratoriais de cavitação, acredita-se que os danos causados por sua presença sejam similares (ASTM INTERNATIONAL, 2010).

A seguir é possível ver na Figura 11 um esquema dos testes de cavitação laboratoriais segundo a Norma ASTM G32:

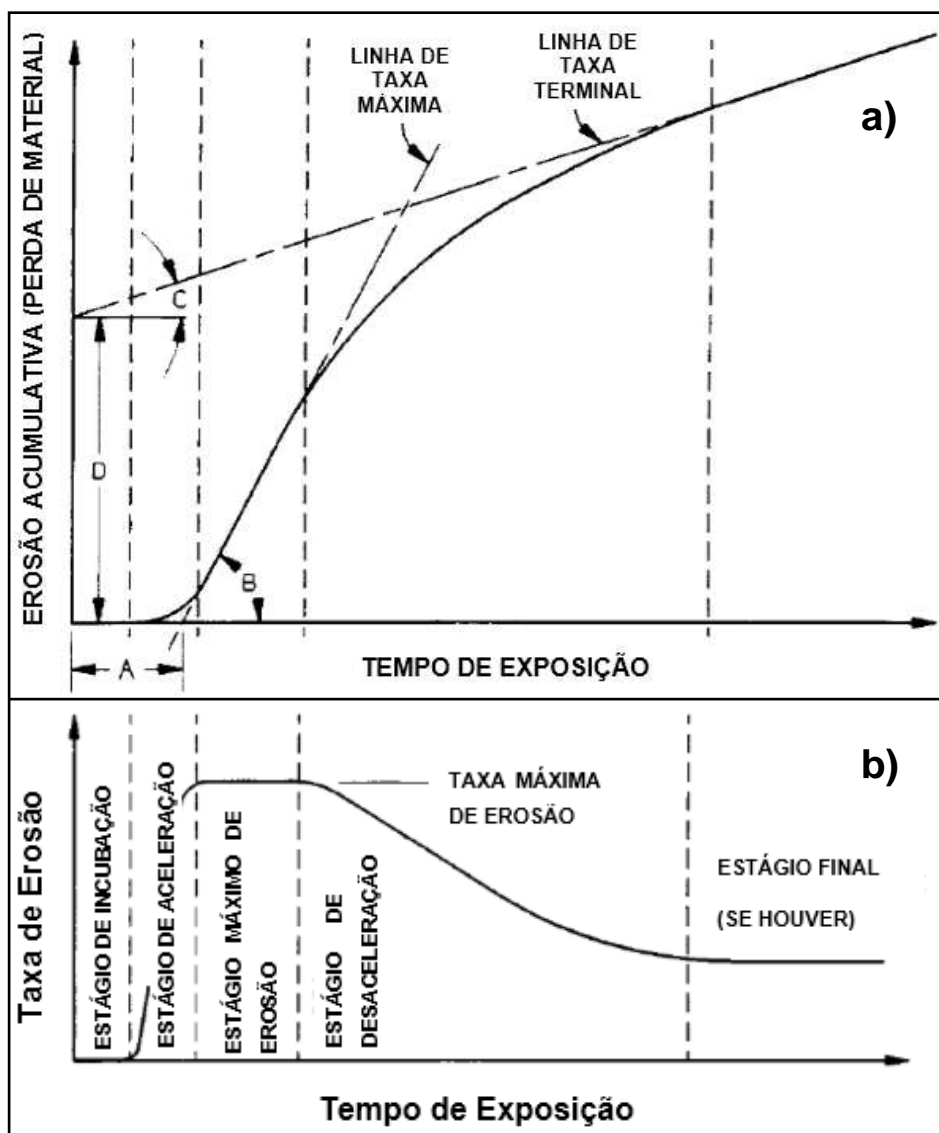
Figura 11 – Esquema de Testes de Cavitação Laboratoriais



Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2010).

Diversas curvas características de erosão acumulativa versus tempo podem ser realizadas a partir do aparato da Figura 11. Alguns estágios e características das curvas de erosão por cavitação podem ser notados na Figura 12:

Figura 12 – a) Taxa de perda em massa vs. Tempo de exposição e b) Estágios Característicos da Taxa de Erosão vs. Tempo de Exposição.



Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2010).

As variáveis A, B, C e D da Figura 12, correspondem à A=Tempo nominal de incubação; (tang B)=Taxa máxima de erosão; (tang C)=Taxa terminal de erosão; e D=Linha de interceptação terminal.

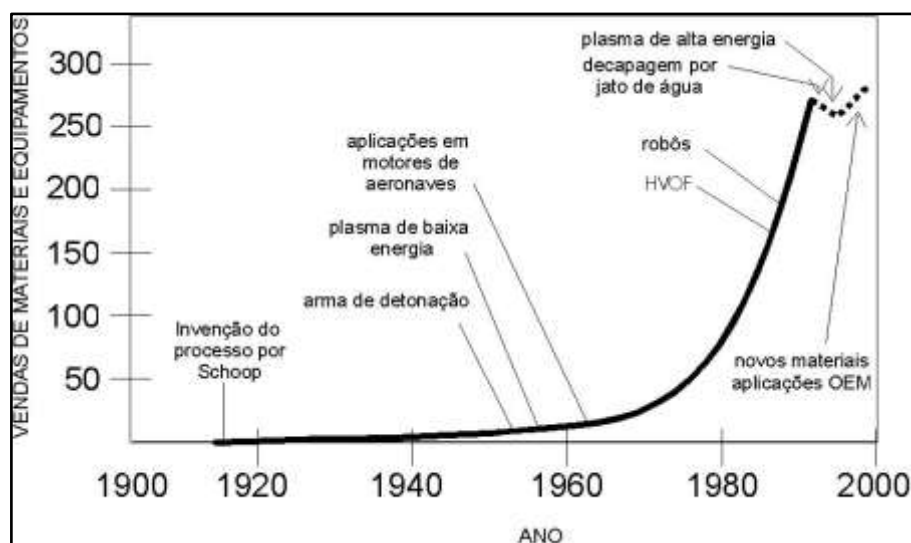
O uso de revestimentos em componentes de bombas hidráulicas traz benefícios contra as ações indesejáveis dos efeitos de cavitação, erosão e corrosão.

2.3 Aspersão Térmica

Inicialmente o revestimento de materiais tinha uma finalidade decorativa. A exemplo disso, segundo (LIMA e TREVISAN, 2007, p. 19) “[...] a maioria das fábricas do Templo de Salomão, 988 a.C., foi revestida com ouro”.

A aspersão térmica teve seus primórdios no início do século XX, quando Max Ulrich Schoop reuniu uma equipe de pesquisadores em Zurich e fez as primeiras experiências de deposição de camadas de metais sobre uma superfície, utilizando basicamente um processo da idade média, no qual se projetavam partículas de metal fundido com jato de vapor ou ar comprimido. Mais tarde em 1910, Max e sua equipe construíram uma máquina para trabalhar com metais em forma de pó, tendo seu princípio inspirado em um equipamento de jateamento de areia. Nos anos 60, devido ao grande crescimento em engenharia, causado pela guerra fria e investimento de grandes nações em materiais de alta tecnologia em aplicações aeroespaciais, a área de aspersão térmica teve grande impulso em seu desenvolvimento (LIMA e TREVISAN, 2007). A Figura 13, mostra o aumento exponencial da utilização da aspersão térmica de 1920 aos anos de 1990.

Figura 13 – Crescimento da demanda industrial pela aspersão térmica



Fonte: Retirado e traduzido de (THORPE, 1993).

BCC RESEARCH (2016) mostra a dimensão econômica deste mercado na atualidade, onde estima-se para os próximos cinco anos, um crescimento na área de tecnologia de revestimentos de pós aspergidos, de \$32,7 bilhões em 2016 para \$46,8 bilhões em 2021, com uma taxa de crescimento anual de 7,5%.

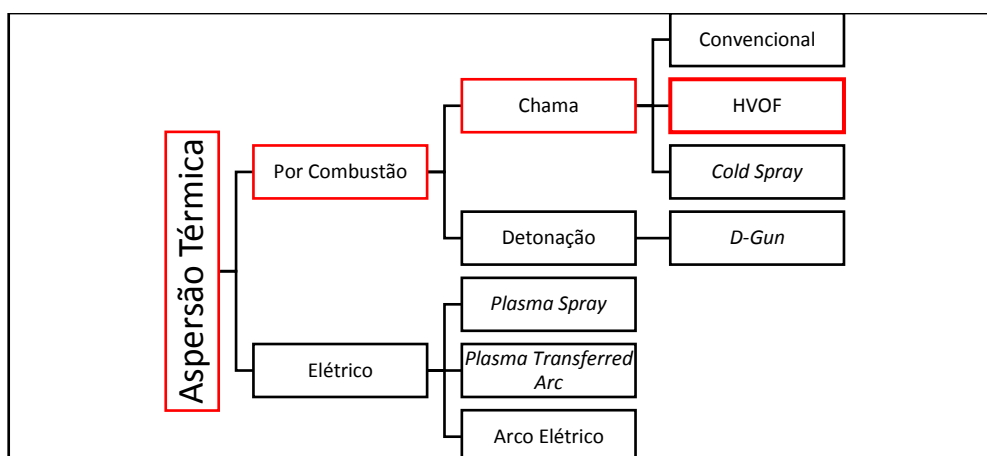
O processo de aspersão térmica consiste em depositar materiais metálicos ou não-metálicos, que são atomizados quando ejetados e podem se encontrar fundidos ou semifundidos, em um substrato preparado, formando uma camada protetora, que tem como característica fundamental, não sobreaquecer o local onde os revestimentos são aplicados. A camada aspergida pode se ancorar ao substrato de forma mecânica, química, metalúrgica, física ou uma combinação destas. O esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica pode ser observado no ANEXO C, desenvolvido pela International Thermal Spray Association, fundada em 1948 aos cuidados da AWS (American Welding Society).

Pode-se classificar os processos de aspersão térmica em dois grandes grupos:

- I. Combustão;
- II. Elétrico.

Este trabalho se volta para o processo de combustão via oxicombustível de alta velocidade (HVOF), como mostrado no diagrama da Figura 14:

Figura 14 – Diagrama dos tipos de processo de aspersão térmica

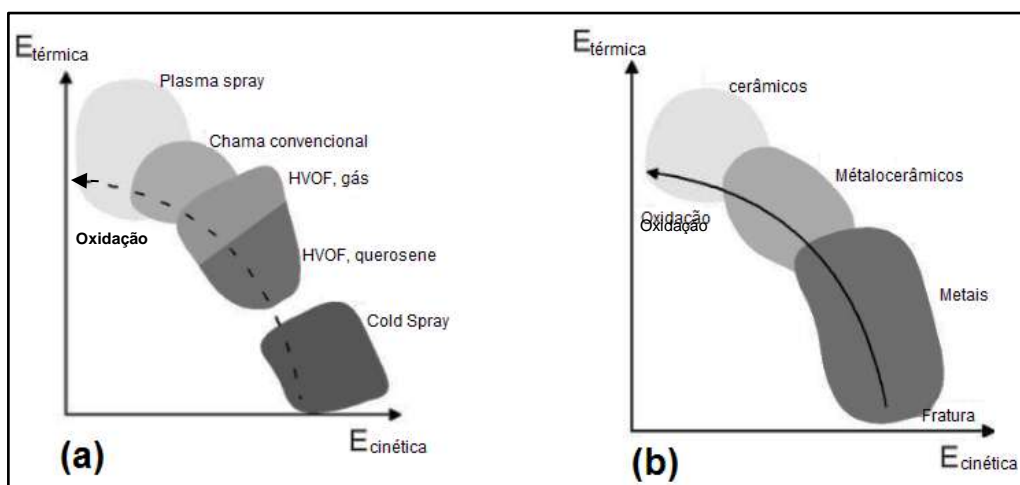


Fonte: Autoria própria.

Não se pode fazer uma comparação direta das propriedades físicas do revestimento aspergido e seu estado manufaturado, ou pré aplicação, pois tanto sua estrutura, quanto a química do revestimento se diferem do estado original. Em parte, isso se deve às reações químicas que ocorrem entre o material e o ar ambiente no instante do jateamento, um exemplo destas reações é a oxidação, fenômeno de troca de elétrons entre duas ou mais estruturas atômicas que acarreta em mudanças nas propriedades químicas e muitas vezes físicas destes componentes.

O nível de oxidação é proporcional à energia térmica de aspersão e está inversamente ligado à energia cinética do jato e sua adesão, ou seja, formas de aspersão térmica com jatos de alta velocidade procuram em parte a redução do nível de oxidação entre as lamelas formadas em contato com o substrato e uma melhor adesão das mesmas entre si como mostra a Figura 15:

Figura 15 – (a) Tipos de pistola de aspersão; (b) Tipos de componentes aspergidos



Fonte: HSU Hamburg, Departamento de Eng. de Materiais, 2007.

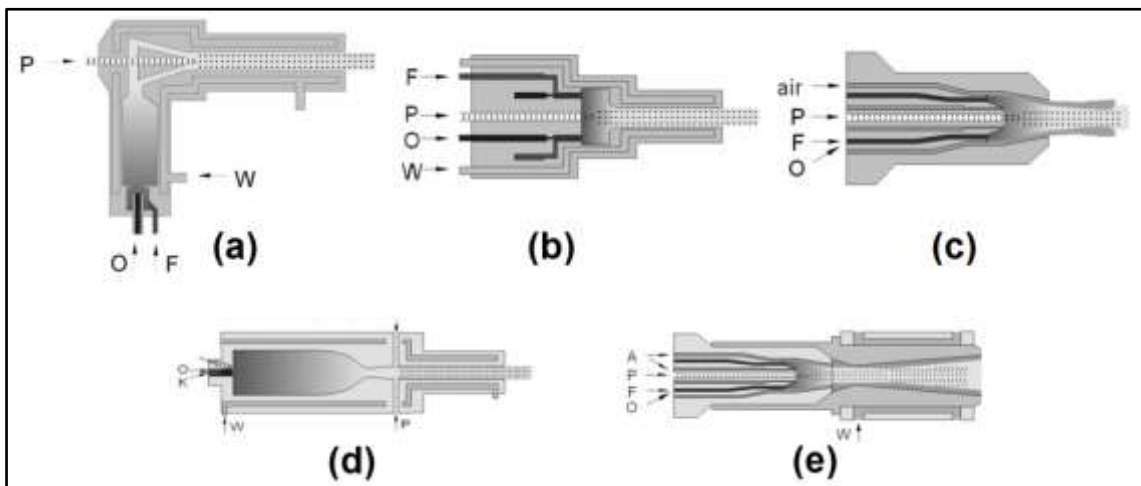
2.3.1 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)

Os primeiros trabalhos feitos utilizando o método HVOF são datados do início da década de 1980, por Jim Browning com a apresentação do sistema Jet Kote, na Thayer School of Engineering, em Hanover EUA (PAWLOWSKI, 1995).

Em comparação com a pulverização de chama convencional, o termo “velocidade elevada” (*High Velocity*) é usado, pois a velocidade do gás de escape alcança velocidades supersônicas. Pós são normalmente usados na aspersão por este processo.

Há atualmente diferentes tipos de pistolas HVOF, com *design* diferente para cada tipo de aplicação, que diferem entre si nas propriedades da camada aspergida, em relação ao desgaste e à corrosão por exemplo. Todos estes sistemas são constituídos por uma câmara de combustão de alta pressão e um bocal de convergência/divergência do tipo (De Laval) (KLASSEN, 2007). A seguir é mostrado na Figura 16 as gerações de pistolas de HVOF, conforme sua evolução:

Figura 16 – Desenho de três gerações de sistemas de pulverização HVOF; 1ª Geração: (a) Jet Kote; 2ª Geração: (b) Top Gun, (c) Diamond Jet; 3ª Geração: (d) JP 5000 e (e) Diamond Jet 2700



Fonte: HSU Hamburg, Departamento de Eng. de Materiais, 2007.

Para a primeira geração de pistolas HVOF, as pressões estão compreendidas entre 3 a 5 bar, com uma potência de saída do bocal de 80kW. Os materiais de alta densidade como o Carbetto de Tungstênio possuem taxas de aspersão do pó em torno de 2 a 3 kg/h, com velocidades de partícula que atingem os 450m/s, no caso de bicos injetores de 1ª geração do tipo (Jet Kote).

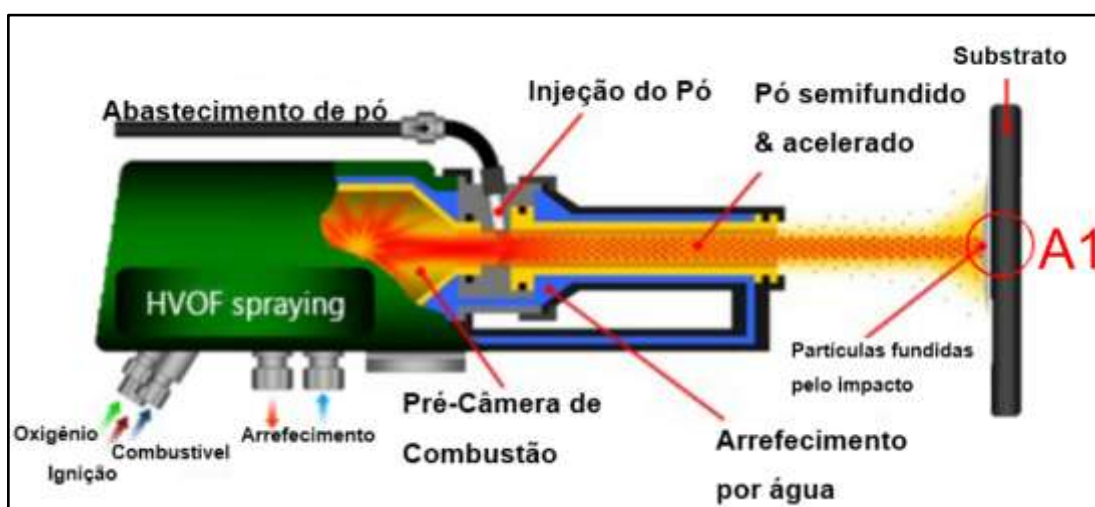
A terceira geração de pistolas HVOF, trabalham com pressões de até 10 bar e saídas com potência de 100kW para o modelo (DJ2700) e 200kW para o (JP 5000).

As taxas de alimentação das pistolas de 3ª geração ficam numa gama de 8 a 18kg/h e velocidades de partículas de cerca de 650m/s, com um aquecimento muito menor pela diminuição do tempo de exposição do pó com os gases de combustão.

Os recentes esforços no desenvolvimento de sistemas de pulverização HVOF visam essencialmente à otimização da combustão e melhora da aceleração de partículas (KLASSEN, 2007).

O processo HVOF tem início com a mistura de gás combustível e oxigênio a alta pressão, que quando em combustão, cria um jato de exaustão de alta velocidade. Resumidamente, a mistura de oxicomcombustível é queimada em uma pré-câmara; os produtos da combustão avançam para um bocal, onde as velocidades do gás se tornam supersônicas, simultaneamente o pó é introduzido no bocal juntamente com um gás inerte de arraste, normalmente no sentido axial, ao unir-se com os gases de escape é então aquecido e acelerado pelo jato supersônico para fora do sistema da tocha de aspersão. A Figura 17 mostra um esquema de funcionamento da pistola de aspersão térmica de terceira geração, do tipo (JP 5000), e o processo de formação da camada fundida:

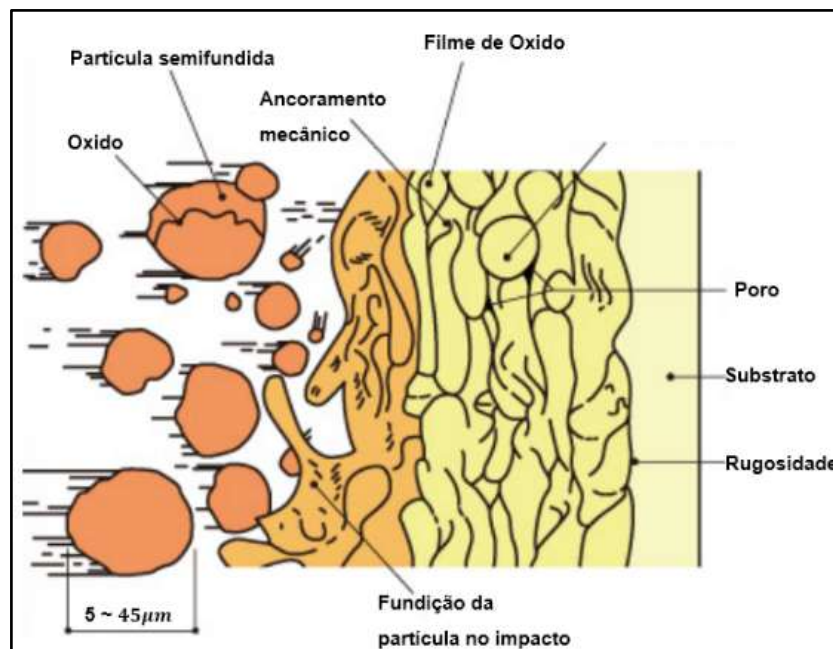
Figura 17 – Esquema de funcionamento de pistola HVOF



Fonte: Adaptado de Flame Spray Technologies, 2016.

A seguir apresenta-se na Figura 18, para maior compreensão dos fenômenos envolvidos, uma ampliação da área A1, referente à região de impacto entre o particulado e o substrato durante a aspersão:

Figura 18 – Ampliação da região de impacto “A1” da partícula contra o substrato durante a aspersão térmica



Fonte: Adaptado de OSAKA FUJI Corporation 2013.

2.3.2 Carbetto de Tungstênio Como Elemento de Aspersão

Algumas aplicações dessa liga: Peças de Aviação, Matrizes de Conformação a Frio, Sedes de Selos Mecânicos, Elementos de desgaste de máquinas agrícolas (sulcadores, subsoladores, navalhas, etc) (RIJEZA , 2016).

O Tungstênio (W) apresenta o maior ponto de fusão e a menor pressão de vaporização dentre todos os metais (MTS , 2017), entretanto uma propriedade que favorece esta liga no processo de aspersão térmica é chamada de DMF (Fator de Dificuldade de Fusão, em tradução livre) e relaciona o calor latente (calor por unidade de volume) e sua densidade, como segue na Equação 5:

$$DMF = \frac{\Delta H_m}{\sqrt{\rho}} \quad (5)$$

Onde: ΔH_m (cal cm^{-3}) – Calor Latente. Em comparação a outros revestimentos o Tungstênio é o elemento que apresenta o menor fator DMF, como visto na Tabela 2:

Tabela 2 – Propriedades de alguns materiais e fator de dificuldade de fusão.

Material	Ponto de Fusão [°C]	Densidade ρ [$g\text{ cm}^{-3}$]	ΔH_m [cal cm^{-3}]	DMF [cal g^{-1}]
<i>Al₂O₃</i>	2 050	4,0	3 900	1 450
<i>ZrO₂</i>	2 715	5,6	3 470	1 446
<i>TiO₂</i>	1 870	4,3	2 550	1 214
<i>Cr₂O₃</i>	2 265	5,2	2 600	1 130
<i>Fe</i>	1 536	7,9	2 177	780
<i>Mo</i>	2 619	10,2	2 233	700
<i>W</i>	3 427	19,35	2 709	616

Fonte: (LIMA e TREVISAN, 2007, p. 73).

A seguir pode-se ver algumas propriedades do WC mostradas na Tabela 3:

Tabela 3 – Propriedades do Carbeto de Tungstênio

Massa molecular relativa	-	195,87
Teor de Carbono	% peso	6,13
Estrutura cristalina	-	Hexagonal
Parâmetros de rede	A°	a=2,9065/ c=2,8366
Densidade	kg/cm ³	0,01577
Micro-dureza (0,49N)	kg/mm ²	1200-2500
Módulo de elasticidade	N/mm ²	696.000
Resistência a flexão	N/mm ²	550
Ponto de fusão	°C	2.720
Coef. dilat. Térmica linear	K ⁻¹	a=5,2*10 ⁻⁶ / c=7,3 ⁻⁶
Condutibilidade térmica	J/(m*s*K)	0,0121
Calor específico (20°C)	J/(mol*K)	39,8

Fonte: (RIBAS, 1991, p. 12)

Comparando a resistência ao desgaste abrasivo, é possível notar o melhor desempenho das amostras com carbeto de tungstênio, com menor perda de massa desgastada do que as de cromo duro. Isto pode ser atribuído à dureza mais alta e ao nível de óxido encontrado em sua camada. “Revestimentos com alto conteúdo de óxido são normalmente mais duros e mais resistentes ao desgaste” (PEJEYD, WIGREN, *et al.*, 1995).

Dados da empresa Rijeza Metalurgia de São Leopoldo – RS sugerem valores de aspersão desta liga em torno de doze mil reais o metro quadrado.

2.3.3 Substrato Metálico AISI 1020

O aço SAE1020 é altamente tenaz, particularmente indicado para fabricação de peças que devam receber tratamento superficial para aumento de sua dureza, ou no caso desta pesquisa, na texturização e limpeza superficial com jateamento de granalha de alumina, para melhor ancoramento mecânico entre as partículas aspergidas e o aço AISI1020.

Amplamente utilizado na indústria, pode-se ver na Figura 19 uma visualização em sua forma comercial.

Figura 19 – Visualização do Aço Carbono SAE 1020



Fonte: (RINOXI STEEL INDUSTRIES, 2015).

Sua composição apresentada com a tolerância dos principais elementos químicos, pode ser vista na Tabela 4:

Tabela 4 – Tolerância química do Aço AISI 1020

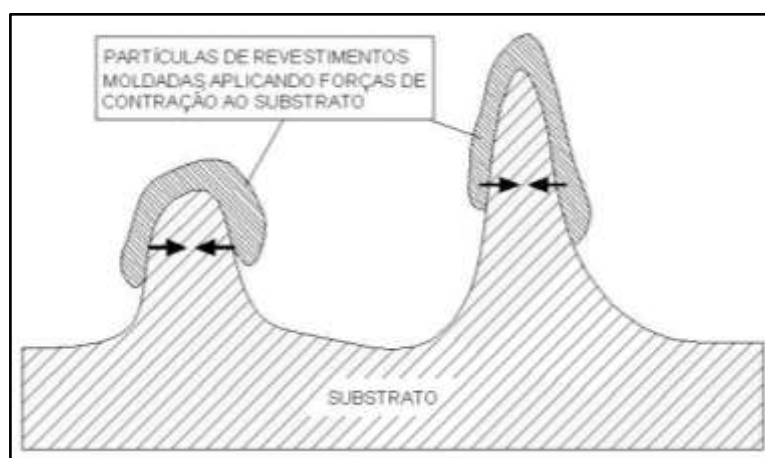
SAE-AISI numero	USN numero	Intervalos químicos e limites, (%)			
		C	Mn	P_{\max}	S_{\max}
1020	G10200	0,18-0,23	0,30-0,60	0,04	0,05

Fonte: (ASM INTERNATIONAL, 2010, p. 149)

Atualmente existem vários padrões de limpeza, sendo as mais adotadas no Brasil a sueca SIS 0559900/1967 e ABNT NBR 6405, que determinam inspeções das superfícies através de padrões que podem ser comparados visualmente (LIMA e TREVISAN, 2007, p. 50).

Em geral, após o jateamento de granalhas de alumina, a superfície do substrato já possui a texturização necessária para aplicação do revestimento. A rugosidade tem influência direta na aderência da camada aspergida, ancorando-se mecanicamente devido a solidificação das partículas, que criam uma força de contração nos picos rugosos da superfície do substrato, conforme pode-se ver na Figura 20. É visto nesta figura que as partículas aspergidas tomam a forma lenticular ao colidirem com a superfície, ancorando-se mecanicamente às rugosidades superficiais devido ao rápido resfriamento (PAREDES, 2009):

Figura 20 – Esquema de ancoragem mecânica das panquecas na superfície rugosa do substrato



Fonte: Dr. Ramón S. Cortés Paredes, UFPR, (PAREDES, 2009).

As características que interferem na força de adesão entre o revestimento e o substrato são basicamente:

- Número de picos e vales dentro de um intervalo determinado do perfil de rugosidade (quanto maior o número, melhor);
- Elevada área superficial efetiva (planificação da área rugosa), pois se tem uma área de ancoragem superior.

A força de adesão, normalmente aumenta com a rugosidade da superfície, contudo essa melhoria diminui para rugosidade média (Ra) superior a 10µm. Esta é associada com a rugosidade comparada a $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas do revestimento (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1985).

A Tabela 1 exibe os valores recomendados pela norma ABNT NBR 6405, de diferentes faixas de Ra, em função de valores mínimos de comprimento de amostragem:

Tabela 5 – Valores de Ra para Comprimentos mínimos de Amostragem

Rugosidade Ra (µm)	Mínimo Comprimento de Amostragem (mm)
0 a 0,3	0,25
0,3 até 3	0,8
Maior que 3	2,5

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010)

No ANEXO D encontram-se os principais parâmetros de avaliação da rugosidade segundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

2.4 Tratamento de Superfícies por Laser em Metais

Na atualidade Lasers são utilizados em diferentes segmentos na cadeia de manufatura industrial (SILVA, 2010), dentre eles o processamento de superfícies, com finalidades diversas, incluindo tornar os componentes mais resistentes contra sobrecargas através do endurecimento superficial, refusão de componentes do material, geração de tensões residuais compressivas e modificação das propriedades físico-químicas de uma forma geral.

Estas finalidades vêm da necessidade da superfície de diferentes componentes industriais exigirem propriedades específicas e distintas do restante do material, criando o campo conhecido como Engenharia de Superfície e em específico os tratamentos superficiais.

Os Lasers ocupam diferentes comprimentos de onda na escala do espectro, sendo os mais conhecidos industrialmente:

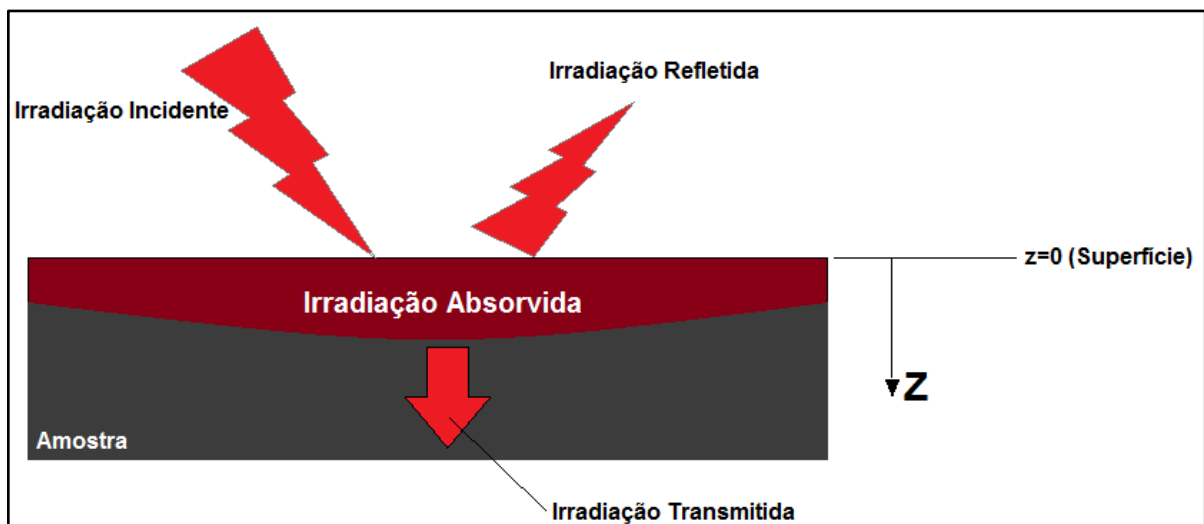
- CO_2 – $\lambda = 10,6\mu\text{m}$;
- Nd: YAG – $\lambda = 1,06\mu\text{m}$;
- Laser a fibra dopada com itérbio – $\lambda = 1,07 \sim 1,08 \mu\text{m}$.

Estes três tipos de Laser juntos equivalem a 96% de todos os Lasers industriais comercializados (LIMA, 2015).

2.4.1 Interação da Radiação Com a Matéria

Ondas eletromagnéticas irradiadas sobre a matéria possuem um comportamento há anos estudado e descrito pela área de transferência de calor, podendo ser simplificadas conforme mostra a Figura 21:

Figura 21 – Interação da irradiação com a matéria



Fonte: Adaptado de (TELEGINSKI, 2016, p. 35).

Como consta na figura acima, parte da energia incidente na superfície é absorvida pelo material, promovendo o aquecimento da amostra, outra parte refletida e por fim, caso o material seja transparente ou semitransparente para o comprimento

de onda incidente, uma terceira parte pode ser transmitida através do eixo transversal (TELEGINSKI, 2016, p. 35).

Segundo Steen e Mazunder (2010), a energia incidente absorvida pelo material pode ser descrita pela Lei de Beer-Lambert e expressa pela Equação 6, (apud TELEGINSKI, 2016, p. 35):

$$I_{(z)} = I_0 e^{-\beta z} \quad (6)$$

Onde Z (m) – Profundidade e β é dependente do tipo de material, comprimento de onda (λ) do Laser e da temperatura superficial. Segundo Crafer e Oakley (2013), para materiais com coeficiente de absorção elevado no comprimento de onda Laser utilizado, a profundidade na qual a energia é absorvida é da ordem dos nanômetros, como é o caso do aço carbono irradiado com Laser de CO_2 ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$), onde a profundidade de absorção é aproximadamente 30nm, (apud TELEGINSKI, 2016, p. 35).

O que se prevê então é que a energia da irradiação absorvida, é difundida por sua conversão em energia térmica (calor) no processo de condução térmica, para camadas mais profundas na amostra. “A extensão da difusão do calor no material é estimada por meio do comprimento de difusão térmica $L_{D10\%}$, que é definido como a distância na qual a temperatura decai a 10% da temperatura da superfície” (TELEGINSKI, 2016). Pela importância dessa difusão em processos metalúrgicos, tal como o tratamento à Laser em revestimentos por HVOF, para que se determine a espessura máxima da camada a ser aspergida, onde se consiga alcançar a interface entre revestimento/substrato com a energia proveniente da irradiação, é inserido a Equação 7, proveniente de (STEEN e MAZUNDER, 2010):

$$L_{D10\%} = 2\sqrt{\alpha t_i} \quad (7)$$

Como pode ser observado, este comprimento depende das propriedades térmicas do material e do tempo de irradiação com o Laser (t_i), onde: α é a

difusividade térmica do material, dada por $\alpha = k/(\rho C_p)$, ou seja, dependente do C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) – Calor Específico do Material e de k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) – Condutividade térmica.

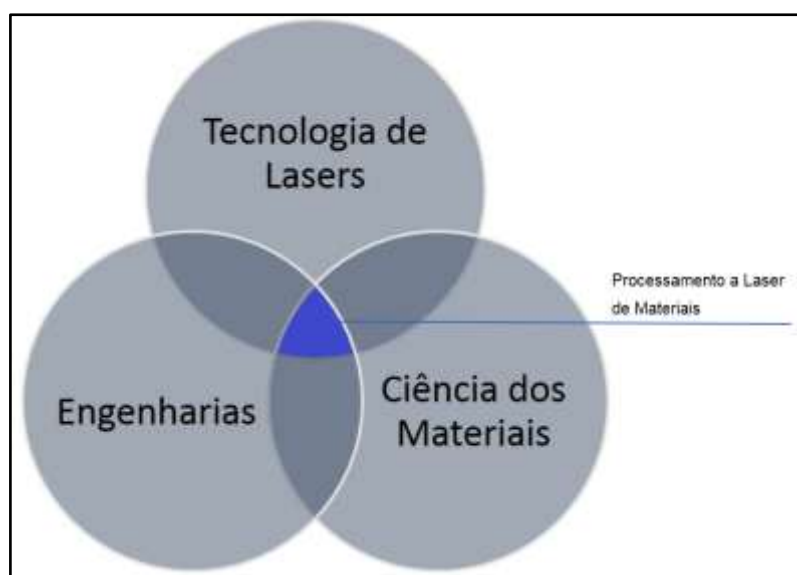
A Tabela do ANEXO D mostra as principais constantes térmicas dos materiais de interesse deste trabalho.

2.5 Laser de CO₂

“Devido à sua confiabilidade e durabilidade como fonte de radiação, o laser de CO₂ está bem estabelecido no processamento de materiais a Laser” (TRUMPF BRASIL, 2016).

A seguir é apresentado na Figura 22, as áreas de conhecimento que formam o setor de processamento a Laser de materiais:

Figura 22 – Setor de Processamento de materiais a Laser



Fonte: Autoria Própria.

O modelo de Laser de CO₂ utilizado é o “*Evolution 125*”, fabricado pela empresa Synrad.

A seguir é mostrado na Figura 23, uma foto do modelo. Para mais detalhes a respeito das especificações técnicas do Laser utilizado vide ANEXO E.

Figura 23 – Laser Evolution 125



Fonte: (SYNRAD, 2016).

Esse Laser é acoplado um sistema de escaneamento do tipo “*scan head*”. Alguns dos aspectos do Laser utilizados no processamento do revestimento de Carbetto de Tungstênio são:

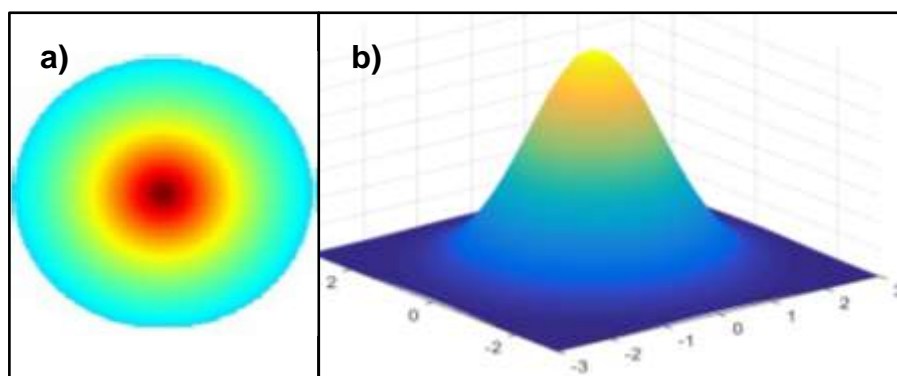
- Potência;
- Velocidade de varredura;
- Resolução;
- Duração do feixe pulsado;
- Sentido de aplicação (horizontal ou vertical).

2.5.1 Potência

A potência dissipada pelo Laser contra a superfície foi de 125W, sendo que o diâmetro do feixe é de 0,2mm. A seguir é apresentado na Figura 24 a distribuição

gaussiana de intensidade na irradiação do feixe de Laser, em uma visão bidimensional, sendo que o centro corresponde a região de maior irradiação.

Figura 24 – Intensidade na irradiação do feixe de Laser. a)Visão bi e b)Tridimensional



Fonte: Autoria Própria.

2.5.2 Velocidade de Varredura

O Laser percorre a superfície das amostras com uma velocidade que varia de 50 a 400mm/s. Como em algumas amostras utilizou-se mais de uma aplicação de Laser com parâmetros de velocidade diferentes, montou-se na metodologia tabelas para a compreensão do processo.

2.5.3 Resolução

A resolução, também conhecida como sobreposição, é controlada por um parâmetro do software Winmark, denominado PPP (Pulsos Por Polegada). Assim tem-se que 1PPP significa 1 pulso em 1 polegada (25,4mm). Portanto, pode-se definir o PPP a partir da Equação 8:

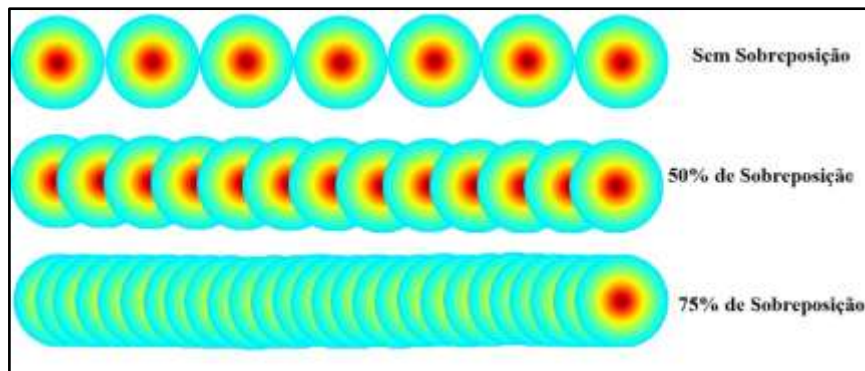
$$PPP = \frac{25,4mm}{\phi_f} \quad (8)$$

Onde ϕ_f (mm) – Diâmetro do foco. Como o Laser em questão possuía um diâmetro do feixe de 0,2mm, tem-se através da Equação 8, uma sobreposição nula de:

$$Resolução = PPP = \frac{25,4mm}{0,2mm} = 127 \text{ pulsos por polegada}$$

Portanto, para valores abaixo de $PPP = 127$, o processo de sinterização/fusão seletiva a Laser é realizado sem sobreposição. A seguir é mostrado na Figura 25, tipos diferentes de sobreposição do feixe de Laser.

Figura 25 – Exemplos de sobreposição do feixe de Laser



Fonte: Autoria própria

2.5.4 Tempo de Interação

O tempo de interação de cada pulso de irradiação do Laser no parâmetro pulsado é dado por \varnothing_f – diâmetro do foco, dividido por v (mm s^{-1}) – Velocidade de aplicação do Laser, segundo a Equação 9:

$$t_i = \frac{\varnothing_f}{v} \quad (9)$$

Este é o tempo que o feixe do Laser demora para percorrer o diâmetro focal da lente escolhida.

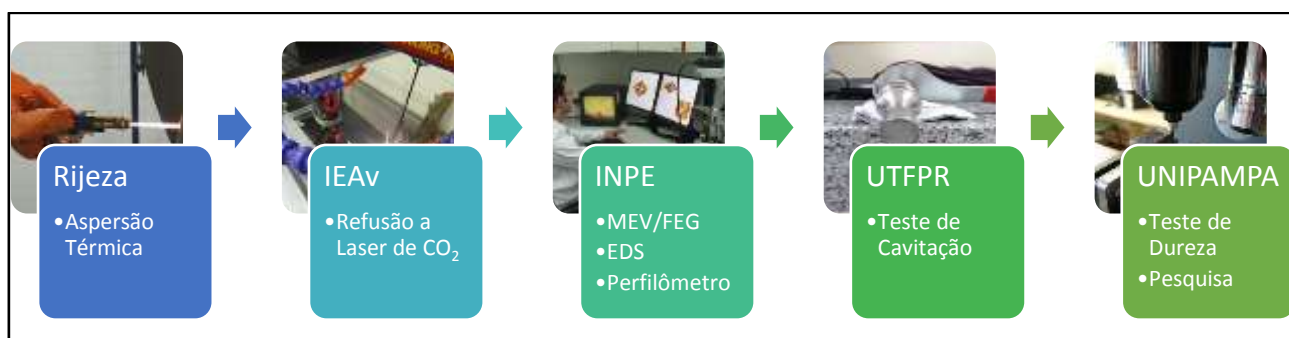
2.5.5 Sentido de Aplicação

O sentido de aplicação do Laser é feito basicamente de duas maneiras, horizontal em relação à face de irradiação, ou vertical. Em alguns testes onde foram realizados mais de uma aplicação de Laser, foram utilizadas ambas as direções a fim de se realizar testes dos efeitos na variação desse parâmetro.

3 METODOLOGIA

Nesta seção apresentam-se o delineamento de pesquisa e a apresentação de ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho conforme Figura 26:

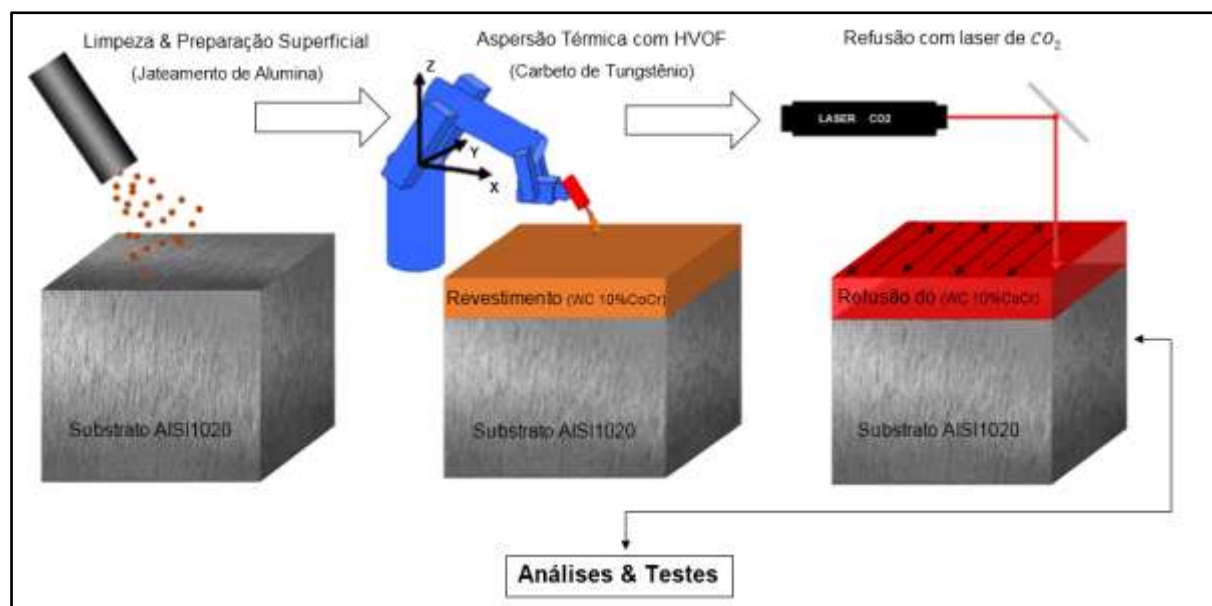
Figura 26 – Síntese de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria Própria.

A seguir é apresentado na Figura 27, um fluxograma da preparação das amostras:

Figura 27 – Fluxograma da preparação das amostras



Fonte: Autoria Própria.

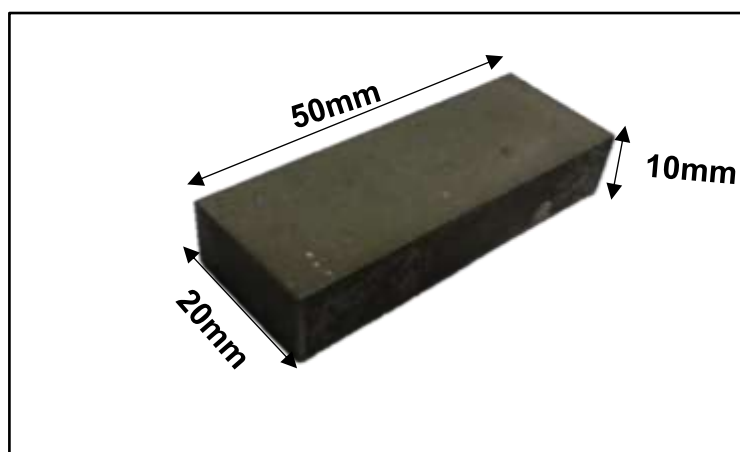
Estas etapas serão detalhadas nos subcapítulos seguintes, sendo a Figura 27, apenas um guia cronológico do processo.

3.1 Substrato Aço AISI 1020

A fim de se trabalhar com um substrato de baixo custo, escolhe-se o aço AISI1020 para integrar o (*core*) das amostras revestidas, devido à competitividade industrial no preço final dos componentes por apresentar excelente relação custo benefício comparado com outros aços e ligas utilizados para o mesmo propósito.

A seguir é apresentado na Figura 28 as dimensões das amostras em aço AISI 1020, fornecidas pela empresa Rijeza Metalurgia, para estudo:

Figura 28 – Amostra do substrato em Aço AISI 1020



Fonte: Autoria Própria.

3.2 Preparação da Superfície por Jateamento de Alumina

Em todos os processos de aplicação de revestimentos, a preparação da superfície desempenha uma função muito importante, tendo em vista que o principal mecanismo de aderência do substrato é o ancoramento mecânico. No caso da aspersão térmica, este pré-requisito é ainda mais crítico, pois a contaminação da superfície com camadas de óxidos, poeira ou resíduos de abrasivos pode comprometer a aderência do revestimento e conseqüentemente o seu desempenho. Por esta razão o processo mais comum de limpeza da superfície é o método de jateamento abrasivo, utilizando normalmente, o óxido de alumínio puro (isento de contaminação com óxidos ou com sais solúveis).

A seguir pode-se ver na Figura 29 o abrasivo de óxido de alumínio (Al_2O_3) utilizado.

Figura 29 – Abrasivo Óxido de Alumínio



Fonte: (MAXJATO, 2014).

Por ser um abrasivo de alta dureza (9 na escala Mohs), resistente a altas temperaturas, ele confere boa rugosidade ao material jateado. Sua utilização é feita em cabine de jateamento, utilizado pela empresa Rijeza Metalúrgica, para limpeza de peças em geral, remoção de camadas oxidadas e preparação para revestimentos em metais ferrosos.

O processo por jateamento abrasivo baseia-se no princípio da abrasão, onde partículas de material duro, são impactadas sobre a superfície, através de ar comprimido.

A seguir pode-se visualizar através da Figura 30, a superfície da amostra após a limpeza e texturização superficial por jateamento de alumina:

Figura 30 – Superfície jateada com granalha de alumina



Fonte: Autoria Própria.

3.3 Revestimento com Carbetto de Tungstênio

Escolheu-se o revestimento de Carbetto de Tungstênio pela alta resistência aos desgastes por abrasão, adesão, erosão e desgaste por deslizamento em baixa temperatura devido à sua dureza ser bastante elevada. O revestimento de Carbetto de Tungstênio possui uma estrutura densa, com baixíssimo nível de porosidade. Não recomendável para ambientes corrosivos. Possui algumas propriedades de destaque como vistos neste subcapítulo.

Como método, escolheu-se trabalhar com o componente molecular Tungstênio devido às suas qualidades como elemento de aspersão térmica por HVOF e baixo fator DMF, visto no subcapítulo 2.3.2.

Devido à dificuldade de fusão do Carbetto de Tungstênio, é adicionado à composição original do revestimento, 10% de Cobalto Cromo (CoCr), que atua como elemento autofluxante, tendo a função de dar liga às partículas de Carbetto de Tungstênio, diminuir seu ponto de fusão e aumentar a resistência à corrosão do

revestimento. Para o estudo morfológico deste elemento em pó, foi fornecido pela RIJEZA Metalurgia, uma pequena amostra como pode ser visto na Figura 31:

Figura 31 – Amostra de (Carbeto de Tungstênio 10%CoCr) em pó



Fonte: Autoria Própria.

3.4 Aspersão Térmica Por HVOF

Na sequência realiza-se a etapa de aspersão térmica por HVOF, com particulado de média diametral $43\mu\text{m}$. Neste procedimento a empresa Rijeza, empresa especializada no desenvolvimento e aplicação de revestimentos contra desgastes em máquinas e equipamentos nos diferentes segmentos da indústria, utiliza um braço robótico de seis eixos controlados por CNC (comando numérico computadorizado), com pistolas modelo DJ2700 (combustão a propano) ou JP500 (combustão a querosene), para maior controle dos parâmetros de velocidade e distância de aspersão, criando-se um revestimento de carbeto de Tungstênio padronizado e espessura de aproximadamente $100\mu\text{m}$. A explicação da espessura utilizada será discutida na sessão 3.5.

Salientasse que a empresa Rijeza recebeu certificação ISO 9001:2008 em outubro de 2007.

A seguir mostra-se na Figura 32 o braço robótico utilizado para aspersão térmica:

Figura 32 – Revestimento por aspersão térmica HVOF



Fonte: (RIJEZA , 2016).

3.5 Refusão do Revestimento a Laser CO_2

Após o revestimento na empresa de metalurgia em São Leopoldo/RS, as amostras são levadas ao IEAV em São José dos Campos para serem refundidas via Laser de CO_2 .

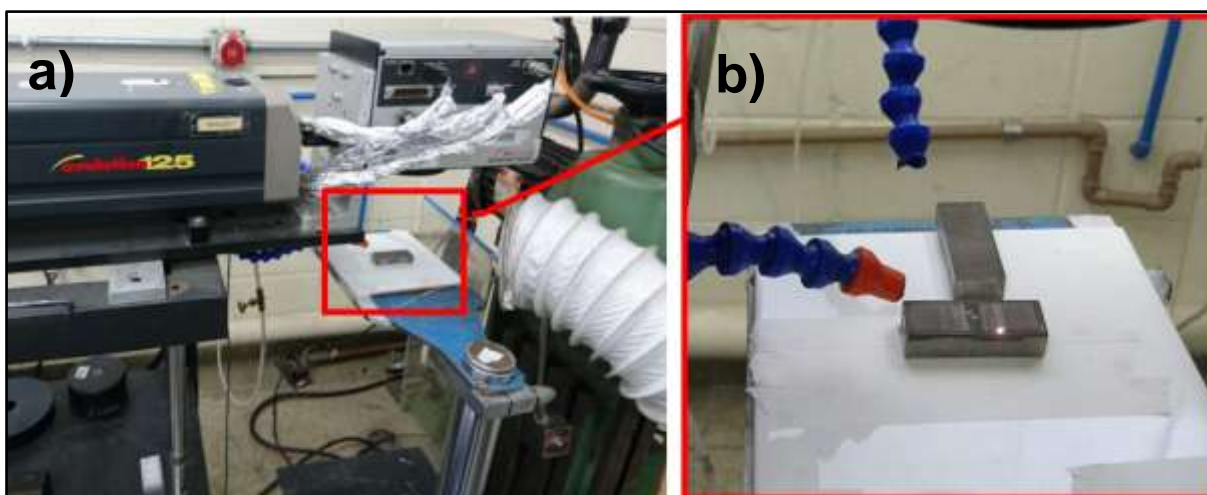
O processo de operação do Laser consiste em alguns cuidados básicos em sua operação como listados a seguir:

1. Utilizar óculos de proteção contra raios UV;
2. Ligar o sistema de refrigeração do bulbo de irradiação;
3. Retirar a tampa de proteção da lente focal;
4. Abrir o software que controla o aparelho;
5. Antes de iniciar a irradiação, ligar o sistema de exaustão e gás de proteção (Acetileno).

Após estes procedimentos é necessário o ajuste focal entre a amostra e a lente, feita mecanicamente através de uma alavanca que faz o movimento vertical da peça. A lente utilizada possui um diâmetro focal e distância focal de 0,2mm e 125mm respectivamente.

A Figura 33 mostra a bancada de testes do Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Lasers e Óptica (Dedalo), no IEAv:

Figura 33 – a) Bancada de irradiação, Laser de CO₂; b) Zoom da irradiação na amostra de Carbetto de Tungstênio



Fonte: Autoria própria, 2017.

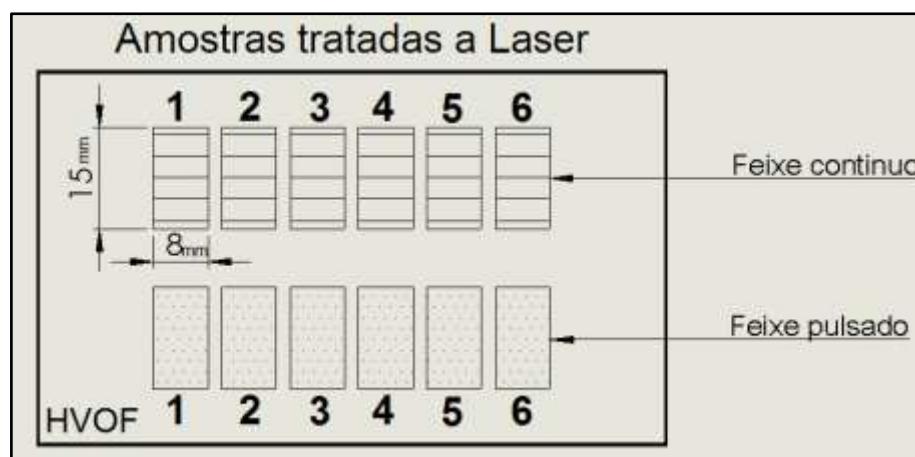
A irradiação com feixe de Laser possui diversos parâmetros para ajuste como mostra a seção 2.4, sendo comum fazer um pré-aquecimento superficial para diminuir os efeitos prejudiciais da diferença entre dilatação térmica do revestimento/substrato. Esta pesquisa teve início utilizando doze amostras processadas a Laser, divididas em dois grandes grupos:

- I. Feixe contínuo (6 amostras);
- II. Feixe pulsado (6 amostras).

Na Figura 34 é exemplificado o modo de distribuição das amostras enviadas ao IEAv de São José dos Campos, em um estudo preliminar de iniciação científica

de 2016, desenvolvido na Unipampa sob a orientação da Professora Dr.^a Ana Cláudia Costa de Oliveira:

Figura 34 – Tipo de feixe de Laser no tratamento das amostras aspergidas por HVOF



Fonte: Autoria Própria, Iniciação Científica 2016.

Os parâmetros utilizados em pesquisa preliminar na iniciação científica encontram-se no APÊNDICES A e B. Esse estudo inicial foi de fundamental importância para a melhor compreensão dos efeitos da variação dos parâmetros do Laser, na refusão do revestimento e o substrato para a obtenção de uma ligação metalúrgica. Espera-se que desta forma, haja uma diminuição do deslocamento da camada revestida, pois o ancoramento mecânico possui uma adesão muito inferior ao ancoramento metalúrgico.

Após a observação criteriosa e análises dos efeitos de cada parâmetro nas doze primeiras amostras, decidiu-se trabalhar em conjunto com parâmetros semelhantes, desenvolvidos no IEAv segundo o trabalho de (PITA, VASCONCELOS, *et al.*, 2016), o qual já havia demonstrado resultados de ligação metalúrgica entre substrato e revestimento.

Os parâmetros utilizados estão dispostos na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Parâmetro utilizado na irradiação a Laser de CO₂

Pré-Aquecimento					Irradiação				
1ª Aplicação					2ª Aplicação				
Forma do Feixe	V (mm/s)	P (%)	Resolução	T.P. (ms)	Forma do Feixe	V (mm/s)	P (%)	Resolução	T.P. (ms)
Pulsado	300	100	254	20	Contínuo	50	100	300	20

Fonte: Autoria Própria.

Com as constantes térmicas do Tungstênio a 1.000K do ANEXO D, temos que a difusividade térmica é:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{118}{19.300 * 148} = 4,1311 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

∴

Com os dados do diâmetro focal e velocidade de varredura é possível calcular através da Equação 9, o tempo de interação utilizado neste trabalho, tanto para o pré-aquecimento, quanto para a irradiação como sendo:

$$t_i = \frac{\phi_f}{v} = \frac{0,2}{300} = 0,66ms \text{ (pré-aquecimento);}$$

$$t_i = \frac{\phi_f}{v} = \frac{0,2}{50} = 4ms \text{ (irradiação).}$$

Pode-se assim calcular a extensão da difusão do calor irradiada pelo Laser no material, através do comprimento de difusão térmica, como sendo:

$$L_{D10\%} = 2\sqrt{\alpha t_i} = 2\sqrt{4,13107 * 10^{-5} * 6,66 * 10^{-4}} = 332\mu m \text{ (pré-aquecimento);}$$

$$L_{D10\%} = 2\sqrt{\alpha t_i} = 2\sqrt{4,13107 * 10^{-5} * 4 * 10^{-3}} = 813\mu m \text{ (irradiação).}$$

∴

Acredita-se que apesar do fluxo de calor não ser unidirecional, considerando assim apenas perdas por condução, os comprimentos de difusão térmica estão no mínimo 3,32 vezes maiores do que a espessura do revestimento, de $100\mu\text{m}$, garantindo que a energia do Laser chegue de forma efetiva até a interface do revestimento/substrato.

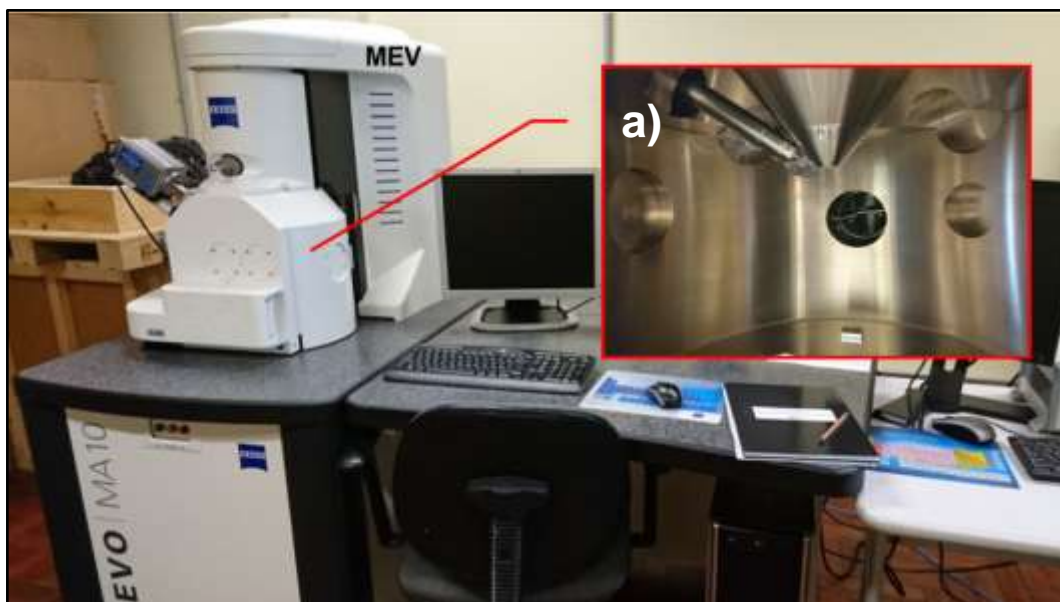
3.6 MEV/FEG e Análise Morfológica de Componentes

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. Essa variação de tensão permite a variação da aceleração dos elétrons rumo ao eletrodo positivo (DEP. DE GEOLOGIA - UFOP, 2017). O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido a maneira com que as imagens são criadas, imagens de MEV tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra (FUNDAÇÃO RICARDO FRANCISCO, 2013). Para a realização deste trabalho utilizou-se dois equipamentos de grande porte:

1. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Zeiss EVO/MA10 – UNIPAMPA/Alegrete;
2. Microscópio eletrônico de varredura com fonte de emissão de campo (MEV-FEG), Tescan MIRA3/LM – INPE/São José dos Campos.

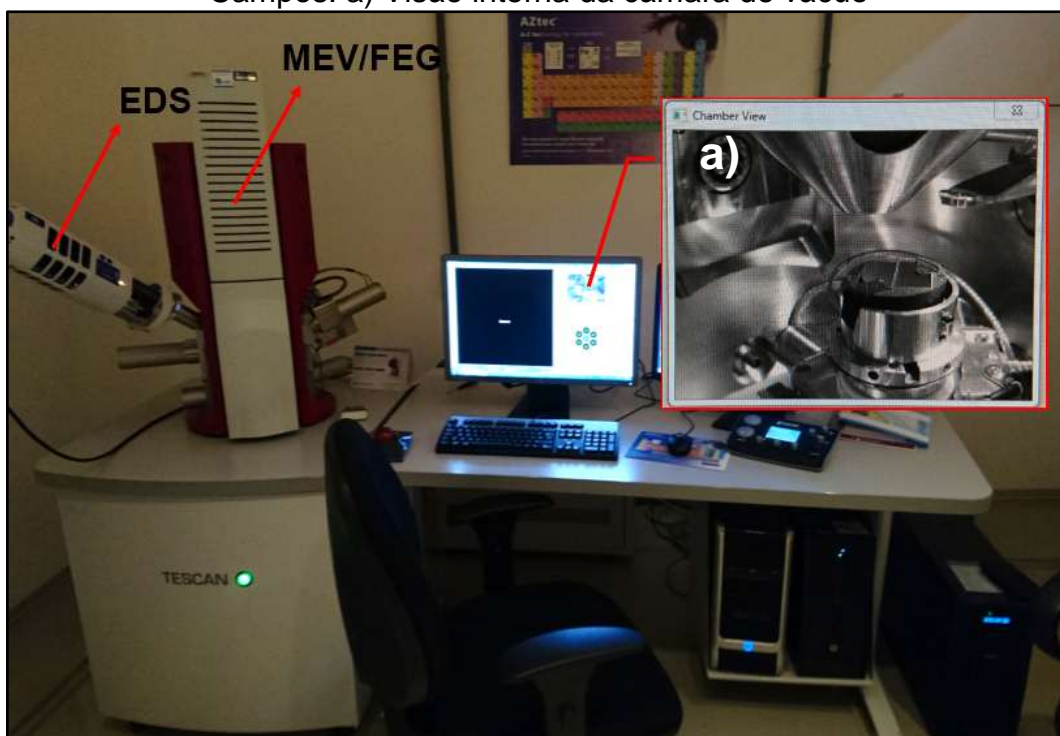
Estes equipamentos são apresentados nas Figura 35 e Figura 36, respectivamente. Ressalta-se que a diferença entre o MEV e o MEV-FEG é que o último dispõe de uma fonte de emissão de campo, que é um microscópio de alta resolução, dedicado à caracterização de materiais nano estruturados, mas que para efeito de caracterização das amostras em questão, não apresenta diferença de imageamento:

Figura 35 – MEV da Universidade Federal do Pampa/ Alegrete. a) Visão interna da câmara de vácuo



Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – MEV/FEG do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ São José dos Campos. a) Visão interna da câmara de vácuo



Fonte: Autoria Própria.

As amostras foram preparadas com ataque químico, utilizando a seguinte mistura de componentes: 0,75g $CuCl_2$; 1,25ml HCl ; 12,50ml etanol.

Com esses equipamentos foi possível analisar também, as partículas de Carbetto de Tungstênio utilizadas na Aspersão Térmica, micro trincas e porosidades resultantes do processo de refusão a Laser.

3.7 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

O EDS (*Energy Dispersive X-Ray Detector*) é um acessório essencial no estudo e caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, os elétrons mais externos dos átomos e íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x.

Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e identificando assim, qual elemento está sendo observado (DEP. DE GEOLOGIA - UFOP, 2017).

A seguir é apresentado na Figura 37 o EDS da OXFORD *Instruments*, utilizado no MEV-FEG do INPE:

Figura 37 – Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)



Fonte: (OXFORD INSTRUMENTS, 2017).

3.8 Microscopia Ótica

Utilizou o microscópio da marca Zeiss Axio ImagerA2, como pode ser visto na Figura 38 (IEAv, São Jose dos Campos):

Figura 38 – Microscópio ótico utilizado



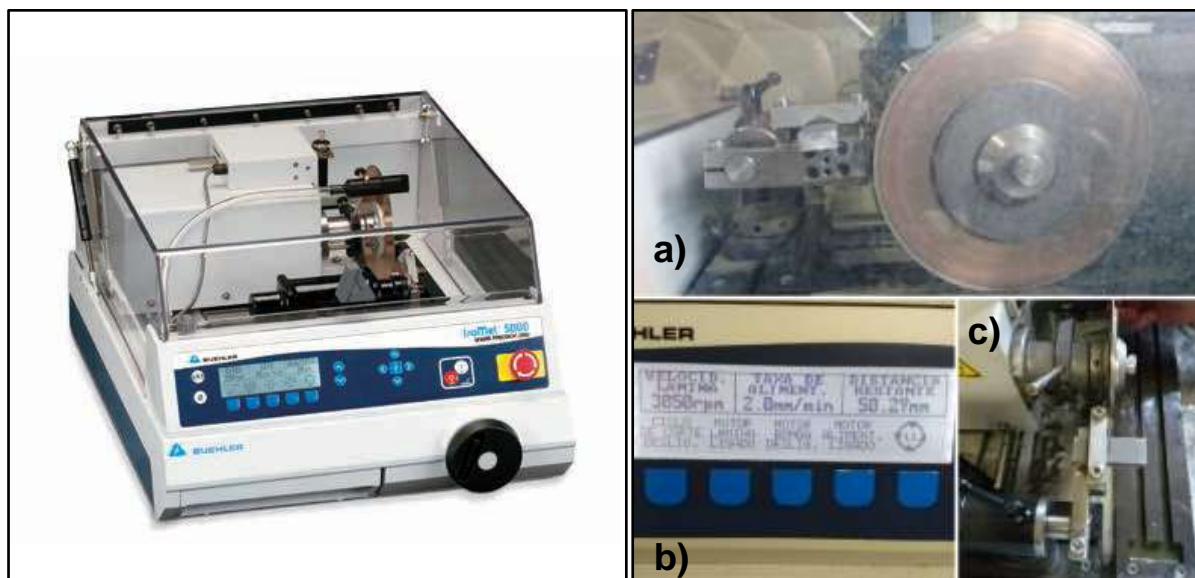
Fonte: Aatoria Própria.

A preparação das amostras para microscopia é de extrema importância para um bom resultado de imagem e qualidade na análise dos efeitos do revestimento e refusão pelo Laser, podendo-se dividir em três etapas básicas como listado a seguir:

1. Corte Metalográfico;
2. Preparação da superfície a ser analisada;
3. Limpeza por Ultrassom.

Para a primeira etapa escolheu-se secionar as amostras utilizando a máquina “IsoMet 5000 Linear Precision Saw”, para corte metalográfico de precisão, como apresenta-se no lado esquerdo da Figura 39:

Figura 39 – Cortadeira Metalográfica de Precisão IsoMet 5000. a) Vista lateral da lâmina de corte; b) Parâmetros de Corte; c) Vista Superior da lâmina de corte



Fonte: (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 8).

Este tipo de máquina é indicado onde seja necessário o mínimo de dano nas amostras, assim as lâminas de corte são muito mais finas do que as utilizadas em policortes tradicionais e a carga aplicada é reduzida substancialmente, fazendo com que menos calor seja gerado durante o processo; os danos causados pela sua influência são mínimos.

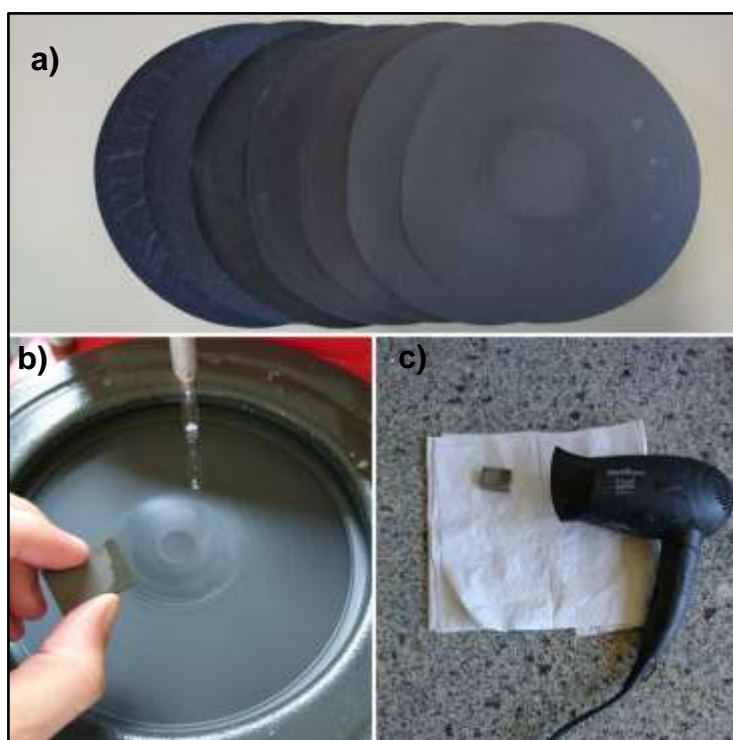
O disco de corte utilizado é indicado para materiais duros e quebradiços, como é o caso de revestimentos de aspensão térmica e foi selecionado da tabela presente no ANEXO F, de acordo com sua disponibilidade no laboratório de sistemas mecânicos da Unipampa. A velocidade da lâmina foi de 3050 rpm e taxa de avanço de 2,0 mm/min. Estas variáveis foram ajustadas segundo o manual disponível da própria fabricante.

A segunda etapa, que compreende a preparação da superfície a ser analisada, foi composta de lixamento, polimento e secagem. A sequência granulométrica de lixas utilizadas foi:

- 120 → 220 → 320 → 400 → 600 → 800 → 1200.

As lixas são da marca “Kligspor EU” e utilizou-se em máquina de lixamento semiautomática por cerca de 4 minutos cada. A seguir apresenta-se na Figura 40 a foto do equipamento utilizado:

Figura 40 – a) Sequência granulométrica; b) Lixadeira automática; c) Secador



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, foi utilizado um pano de polimento com alumina (Al_2O_3) de $1\mu m$, para dar acabamento superficial. A secagem foi a etapa procedente à limpeza por ultrassom.

Por fim as amostras foram limpas com vibração ultrassônica por 5 minutos em equipamento da marca UNIQUE *Ultra Cleaner 1400A*, para remoção de partículas remanescentes da secagem, como fibras de algodão, poeira e outros contaminantes. O aparelho pode ser visto a seguir na Figura 41:

Figura 41 – Aparelho de limpeza por vibração ultrassônica



Fonte: Autoria Própria.

3.9 Rugosidade Superficial

As rugosidades superficiais das amostras foram obtidas através do método de perfilometria ótica, mais especificamente, através de interferometria do MEV-FEG visto na Figura 36.

Foi possível ainda, gerar um gráfico tridimensional da superfície, utilizando o equipamento Veeco WYKO NT1100 do INPE (também por interferometria), como pode-se observar na Figura 42:

Figura 42 – Perfilômetro Veeco NT1100 (*Optical Profiling System*)



Fonte: Autoria Própria.

Para mais detalhes e especificações do equipamento, vide ANEXO G.

3.10 Dureza Por Microindentação

Após análise no M.E.V. constatou-se que as camadas aspergidas nas amostras ficaram com uma espessura média de $100\mu\text{m}$. Ensaios de dureza por microindentação são mais recomendados para medir pequenas dimensões e fases metalográficas específicas. Os dados foram obtidos, utilizando as normas da ASTM E384 e ISO 6507, que regem as medições Vickers e Knoop. O microdurômetro utilizado é o de modelo Buehler Tukon 1102, do laboratório de ensaios mecânicos da Unipampa, com uma carga de 0,5kg, como mostra a Figura 43:

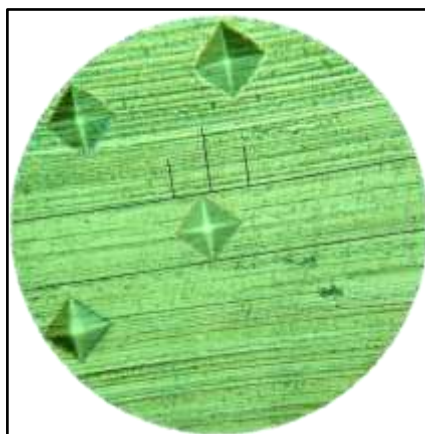
Figura 43 – Microdurômetro Buehler Tukon 1102



Fonte: Adaptado de buehler.com, 2016.

A Figura 44 mostra, apenas como exemplo, a visão do ocular do microdurômetro. Pode-se notar as marcas deixadas pelo indentador com ponteira de diamante na medição de dureza Vickers:

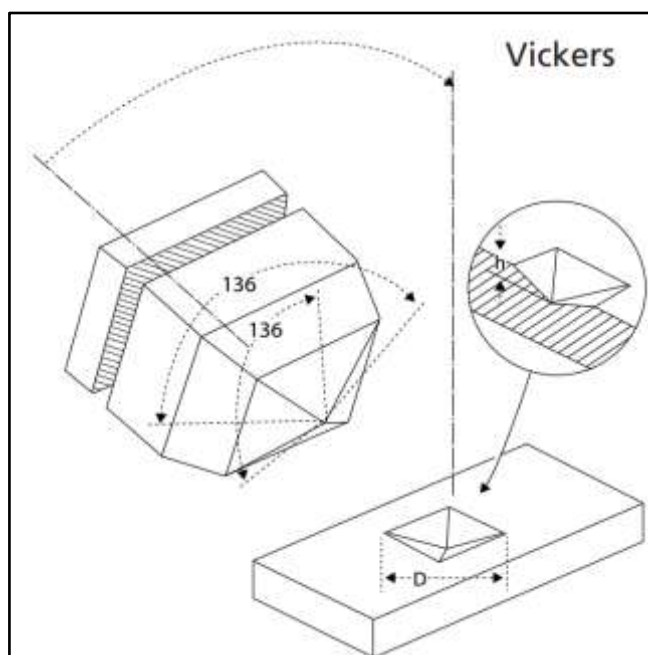
Figura 44 – Visão ocular do microdurômetro, com magnitude de 500X



Fonte: Autoria própria, 2016.

Como pode-se notar, após o teste, é criada uma marca em formato piramidal de base quadrada, com profundidade de aproximadamente um sétimo do comprimento da diagonal (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 105). Esta geometria é vista na Figura 45:

Figura 45 – Esquema de endentadura Vickers e formato de impressão



Fonte: (BUEHLER® SUMMET™, 2013).

O dispositivo aplica a carga lentamente sobre a amostra, sem provocar impacto, mantendo a ponteira sobre a peça por 10 segundos, antes de iniciar o descarregamento. A qualidade física das endentaduras e a acuracidade da carga aplicada (definidas pela E 384), devem ser controladas para garantir os resultados corretos.

Pode-se definir como um dos aspectos que definem a qualidade nas medições, o fato de se deixar uma distância mínima entre endentações de três vezes a diagonal da marca deixada pelo diamante (HASAN, WANG e BERNDT, 2014, p. 156). Isto previne que haja falsos desvios do valor real de dureza, devido ao encruamento do material nas regiões adjacentes à deformação plástica deixada pelo penetrador.

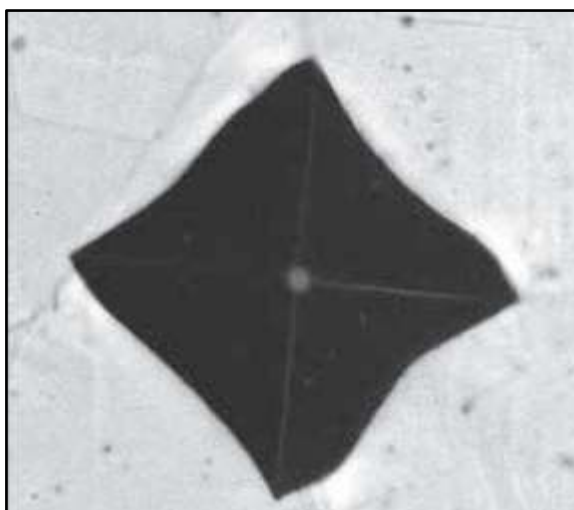
As duas diagonais são então medidas, ficando em torno de 20 a 60 micrômetros. A dureza Vickers (HV) é então calculada através da Equação 10, representando a decomposição da força no sentido da penetração, sobre uma área, utilizando as diagonais como referência:

$$HV = \frac{2L \operatorname{sen}(136^\circ/2)}{d^2} \cong \frac{1854,4L}{d^2} \quad (10)$$

Onde: L (gf) – Carga em grama-força e d (μm) – Comprimento da diagonal da indentadura.

Nos testes é desconsiderado a deformação elástica, quando a carga é removida. Na verdade, há uma deformação elástica e algumas vezes sua presença é bastante pronunciada, causando distorções na indentação, como visto na Figura 46:

Figura 46 – Exemplo de indentação Vickers distorcida (400X)



Fonte: (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 106)

Nestes casos a fórmula proposta pela Equação 10, que calcula a carga sobre a área projetada da impressão, não é bem ajustada e acaba causando erros. A melhor forma de medir a dureza com maior confiabilidade em casos onde a presença de distorções elásticas é notável, é utilizar programas de tratamento de imagem (como

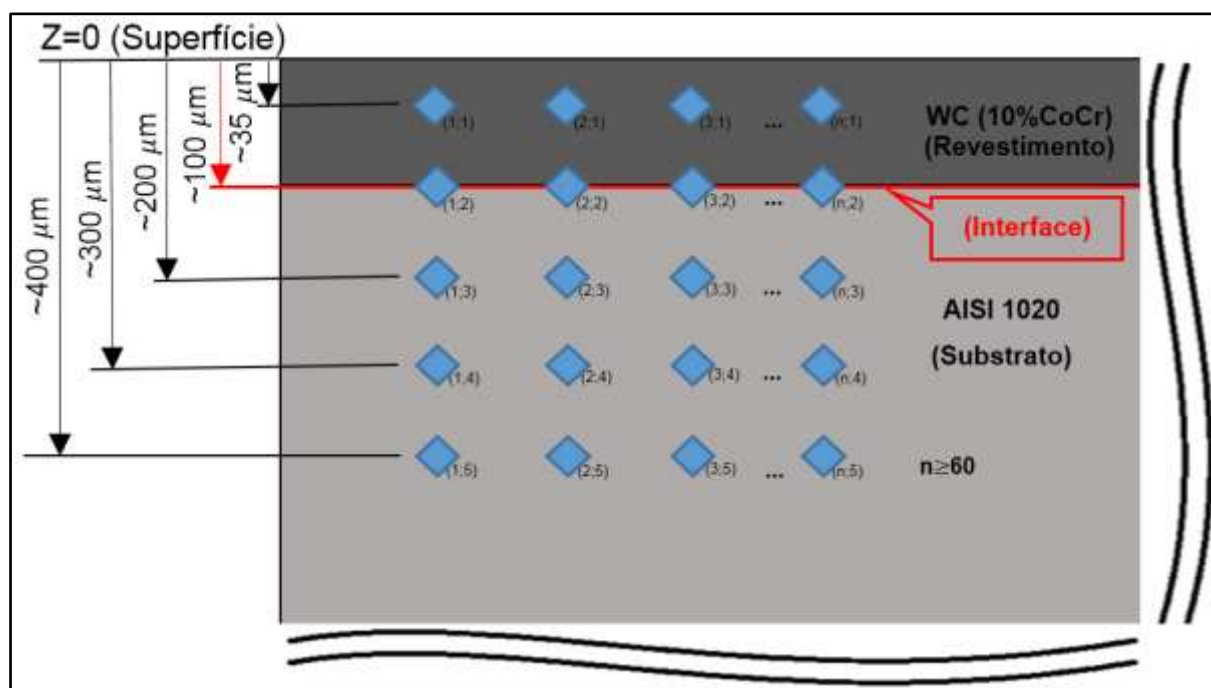
ex. o ImageJ), para descobrir a área projetada real. Como este procedimento levaria muito tempo, a metodologia adotada foi descartar as endentações distorcidas e refazer uma nova em outra região similar. O fenômeno de distorção na indentação é mais comumente visto em materiais anisotrópicos, segundo (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 106).

Alguns fatores que influenciam na precisão e por consequência, no teste de dureza de microindentação Vickers podem ser vistos no ANEXO H.

Foram medidas a dureza em profundidades distintas na secção transversal das amostras, até a dureza tornar-se constante, como esquematizado na Figura 47.

Um mínimo de 60 testes foi realizado em cada nível de profundidade, obtendo-se uma média final de dureza Vickers.

Figura 47 – Esquema de teste de microdureza na secção transversal de uma amostra



Fonte: Autoria própria, 2016.

3.11 Cavitação Por Ultrassom

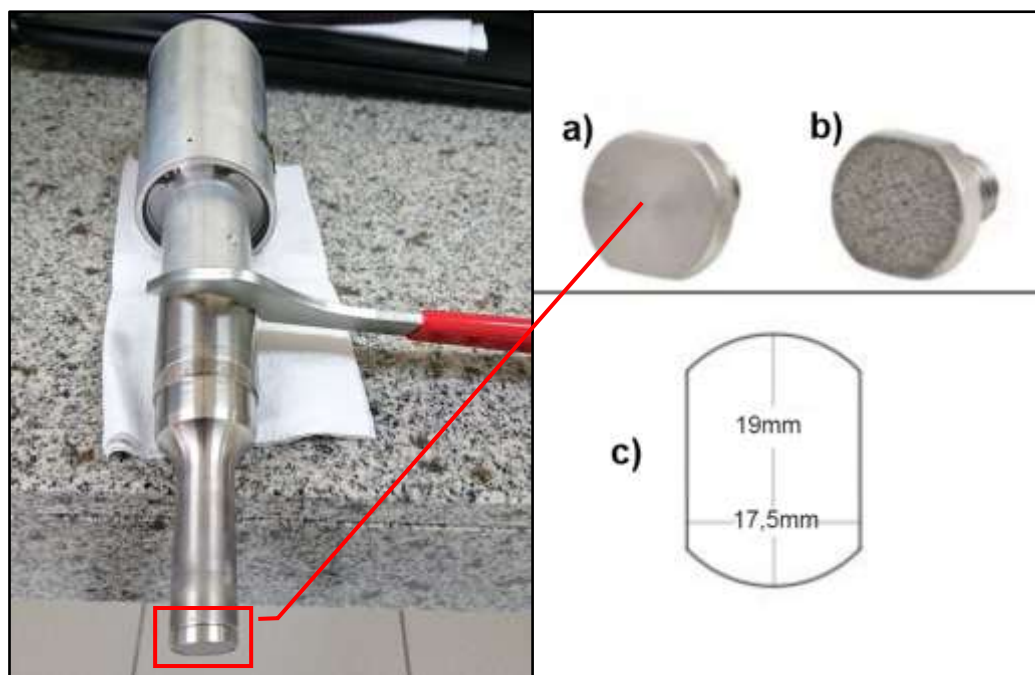
Os ensaios de cavitação são realizados em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na unidade de Ponta Grossa.

Ambas as amostras, aspergida por HVOF e a refundida via Laser, foram preparadas metalograficamente com a seguinte sequência granulométrica de lixas:

- 600 → 1200 → Polimento Alumina ($1\ \mu\text{m}$) → Polimento Alumina ($0,3\ \mu\text{m}$).

Posteriormente as amostras são cortadas em tamanhos de (19x29)mm para se ajustarem ao sonotrodo (*probe/horn*) utilizado como segue na Figura 48:

Figura 48 – Sonotrodo utilizado a) Ponteira nova; b) Ponteira usada; c) Dimensões



Fonte: Autoria Própria.

Para meios comparativos de perda de massa por área, calcula-se a área real da ponteira através de trigonometria, medindo o chanfro existente nas laterais para descontar da área de uma circunferência de diâmetro 19mm, chegando a área de:

$$A_s = 276,069\text{mm}^2$$

Assim pode-se comparar pesquisas que utilizem ponteiros de diferentes diâmetros, através de uma aproximação linear com a área de interesse.

Este componente é feito de uma liga de Titânio (Ti_6Al_4V), especial para esta finalidade, apesar disto a vida útil média da ponteira, é de apenas 20h, sendo necessário uma usinagem para recuperação de sua superfície cavitada.

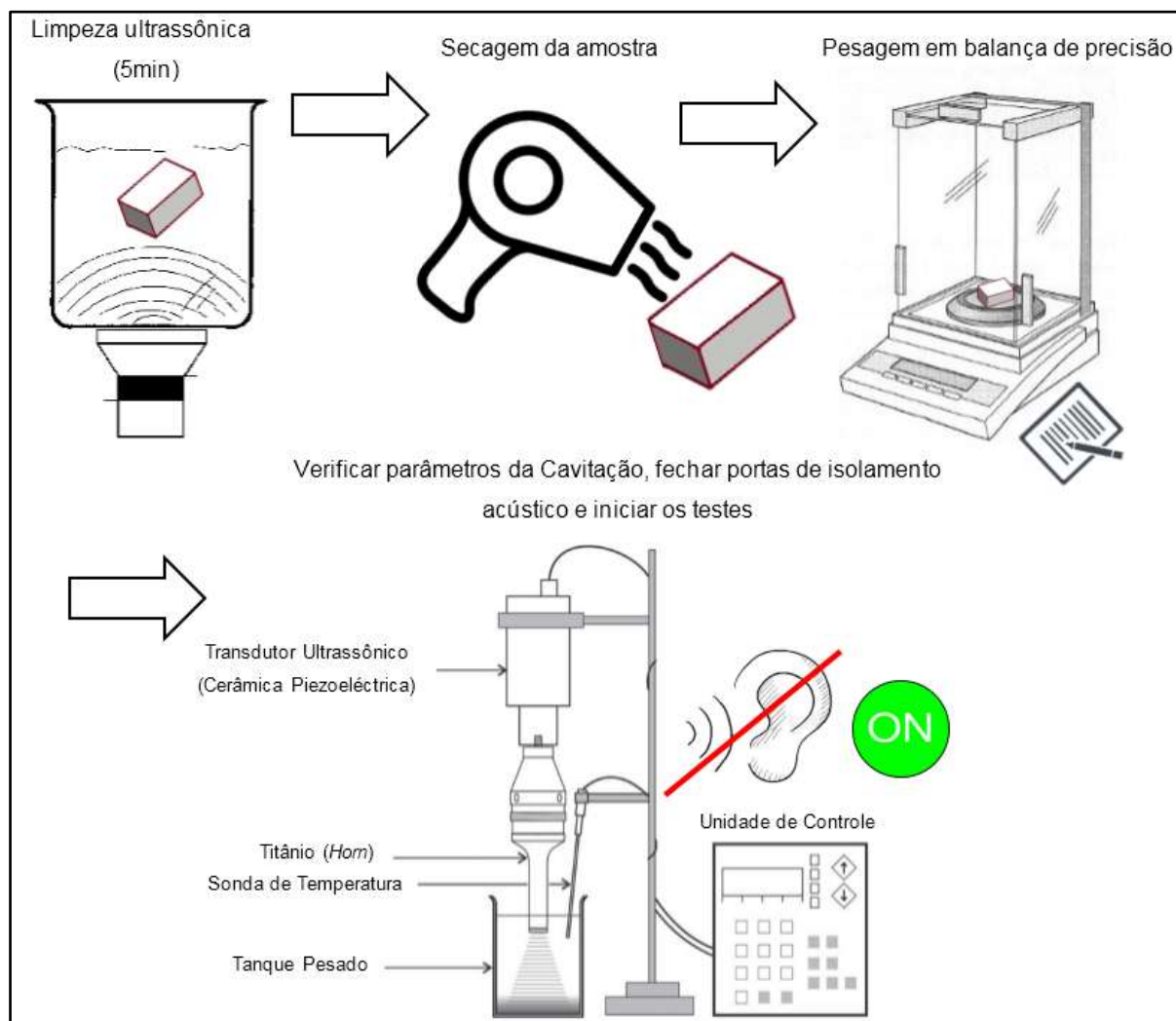
Devido a períodos prolongados de teste, a energia dissipada pelo equipamento causa aquecimento do fluido no tanque de teste, sendo necessária uma bomba de recirculação para o arrefecimento do fluido de trabalho, procurando assim, manter constante a temperatura de teste.

O procedimento de trabalho se repete a cada 30min para obtenção do histórico de perda de massa versus tempo, das amostras, podendo ser visto a seguir:

1. Limpeza das amostras por ultrassom, 5 min, (água destilada);
2. Secagem da amostra;
3. Medição da massa em balança de precisão;
4. Ajuste da amostra no transdutor ultrassônico (espessura de gabarito entre a amostra/ponteira e profundidade de submersão da amostra, aprox. 18mm);
5. Verificação do nível de água destilada no tanque de teste;
6. Verificação da temperatura de trabalho;
7. Fechar portas de isolamento acústico e iniciar o teste.

O diagrama apresentado na Figura 49, simplifica o processo iterativo do teste de perda de massa em cavitação realizado no laboratório da Universidade Federal Tecnológica do Paraná, no campus de Ponta Grossa (UTFPR – Ponta Grossa).

Figura 49 – Diagrama do Procedimento Operacional



Fonte: Autoria Própria.

A seguir é visto na Figura 50 que o equipamento de ultrassom utilizado, está isolado por uma câmara acústica, devido à alta intensidade de ruído gerado por este equipamento.

Figura 50 – Ajuste dos Parâmetros. Equipamento de Cavitação (Laboratório de Metalografia/UTFPR – Ponta Grossa)



Fonte: Autoria Própria.

O equipamento é então calibrado para trabalhar-se com as especificações técnicas da Tabela 7, como segue:

Tabela 7 – Especificações Técnicas de Teste

Especificações Técnicas	
Potência	700W
Frequência	20kHz
Tipo de ponteira (<i>probe</i>)	19mm (3/4")
Amplitude máx. de trabalho	60 μ m
Amplitude de trabalho (80%)	48 μ m
Temperatura de trabalho	18 \pm 2 °C
Folga até a ponteira vibratória	500 μ m
Profundidade de ensaio	12 \pm 4mm
Tempo total de ensaio por amostra	3h30min (210min)
Dimensões da Máq. (W x L x H)	(203 x 387 x 216)mm
Tensão	110V, 50/60 Hz

Fonte: Autoria Própria

As especificações técnicas mais relevantes, como precisão, capacidade máxima de operação e temperatura de trabalho da balança de precisão podem ser vistas no ANEXO I.

Foram tomadas 4 medidas de massa em cada intervalo de tempo, para se ter melhores dados estatísticos de amostragem.

Os dados de Profundidade Média de Erosão são calculados a partir da norma da (ASTM INTERNATIONAL, 2010, p. 2, subcapítulo 3.1.14) dada pela Equação 11:

$$MDE = \frac{m}{(\rho * A_s)} \quad (11)$$

Onde m (kg) – Massa perdida por cavitação e A_s (mm²) – Área da ponteira vibratória.

As Taxas Máximas de Erosão por cavitação, correspondem às Tangentes da região linear dos gráficos de Perda de Massa vs. Tempo e é dado em (mg/min). Quanto menor esta taxa, melhor é a resistência à cavitação de determinado material.

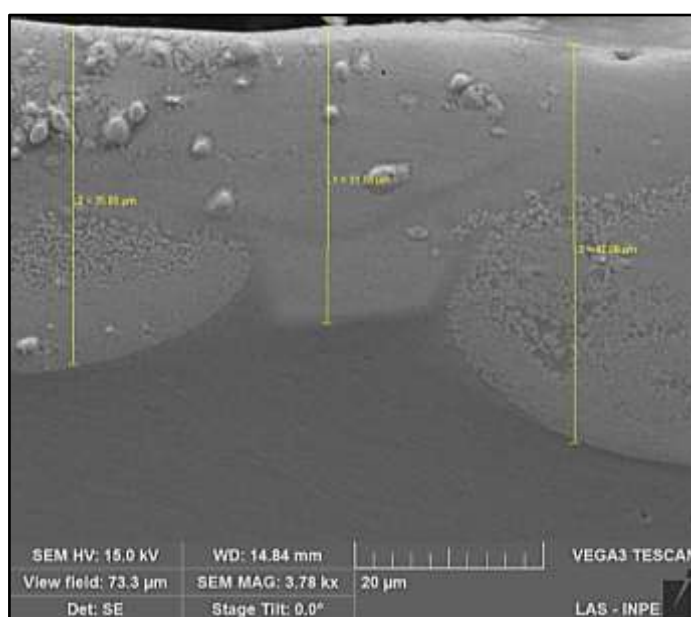
4 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e análises micro estruturais realizadas nas amostras com revestimento de Carbetto de Tungstênio, com e sem refusão via Laser de CO₂.

4.1 Análises Microestruturais

Para análise microestrutural da interface revestimento e substrato do aço AISI 1020, antes e após a aplicação do Laser, foram feitas imagens com o MEV/FEG. Nota-se na Figura 51 que amostras refundidas pelo Laser de CO₂ tiveram uma densificação da camada revestida, diminuindo em mais de 50% sua espessura inicial de 100µm.

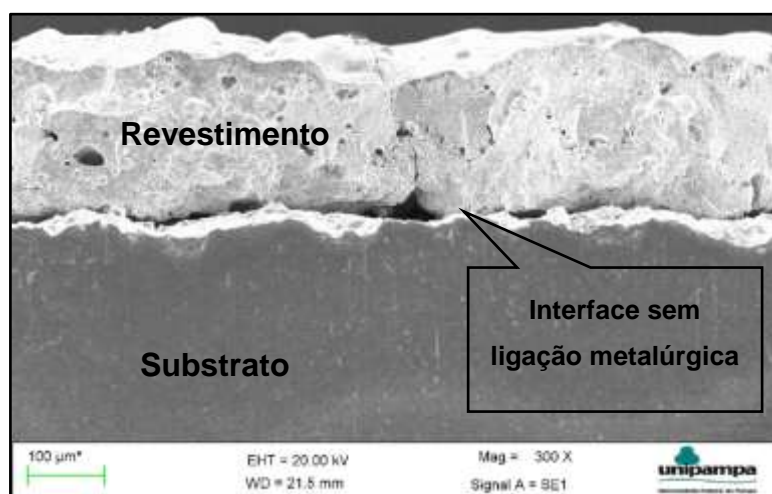
Figura 51 – Espessura Média de Camada (35µm). Revestimento Após Refusão Via Laser de CO₂



Fonte: Autoria Própria.

Como indicativo de ligação metalúrgica, não se percebe na Figura 51 uma interface abrupta entre revestimento/substrato, caracterizada por fissuras, poros ou falhas, como visto na Figura 52 de uma aspersão térmica de WC sem refusão por Laser de CO₂:

Figura 52 – Interface Antes da Aplicação do Laser. Revestimento com espessura de 300 μ m

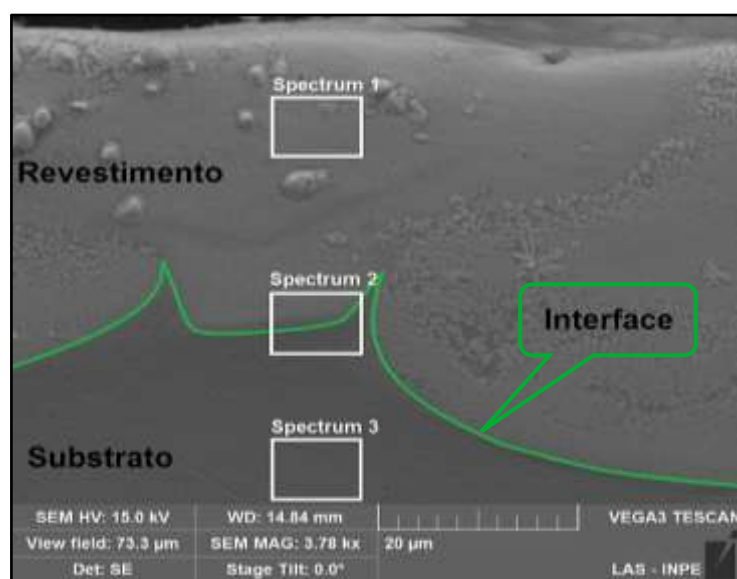


Fonte: Autoria Própria.

4.1.1 Caracterização do Revestimento de WC e Substrato AISI 1020

A fim de se comprovar a microestrutura química do substrato utilizado, realizou-se Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) na região abaixo do revestimento aspergido, como visto na Figura 53 feita pelo MEV/FEG Tescan MIRA3/LM do INPE:

Figura 53 – EDS do Substrato Aço AISI 1020



Fonte: Própria Autoria.

As regiões denominadas *Spectrum 1* e *Spectrum 2* representam respectivamente o revestimento e a interface entre revestimento/substrato e se distinguem pela coloração mais clara se comparação a região do *Spectrum 3*, do Aço AISI 1020.

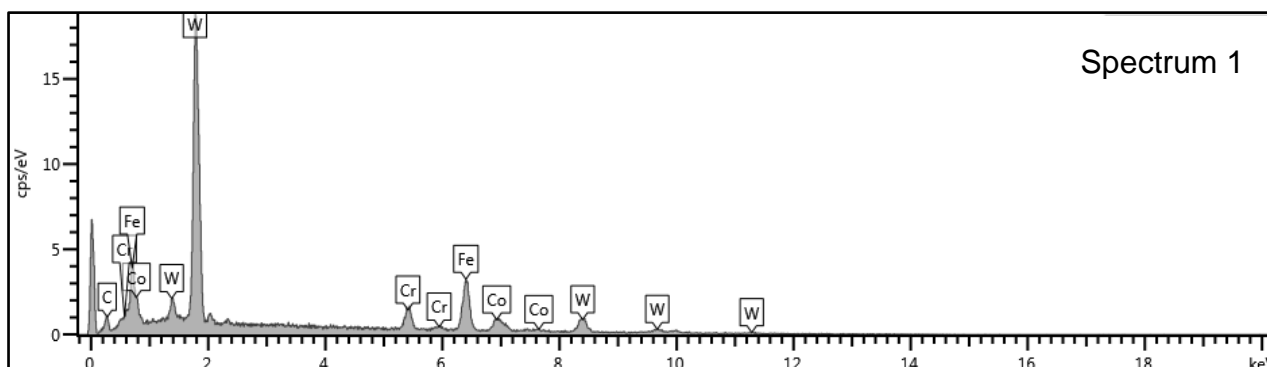
O resultado do EDS encontra-se na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, seus respectivos espectros estão dispostos na Figura 54, Figura 55 e Figura 56. O aço AISI 1020 encontra-se dentro das tolerâncias admitidas pela (ASM INTERNATIONAL, 2010, p. 149), descritos no subcapítulo 2.3.3:

Tabela 8 – EDS do Revestimento Com WC

<i>Spectrum 1</i>		
Elemento	% (Peso)	% (Peso) σ
C	5,07	0,49
Cr	6,45	0,29
Fe	22,63	0,51
Co	6,82	0,47
W	59,04	0,66
Total:	100	

Fonte: Autoria Própria.

Figura 54 – Espectro do Revestimento Com WC



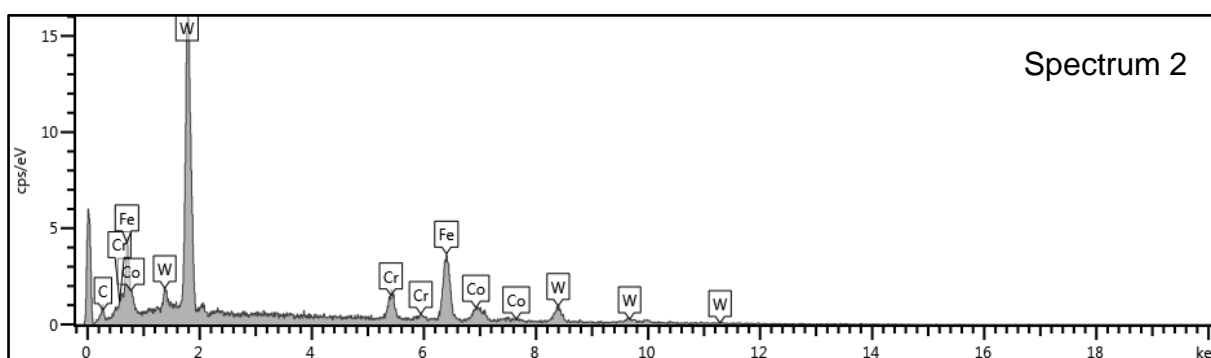
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9 – EDS da Interface Revestimento/Substrato

Spectrum 2		
Elemento	% (Peso)	% (Peso) σ
C	3,9	0,61
Cr	6,94	0,39
Fe	27,86	0,72
Co	6,22	0,62
W	55,08	0,86
Total:	100	

Fonte: Autoria Própria.

Figura 55 – Espectro da Interface Revestimento/Substrato



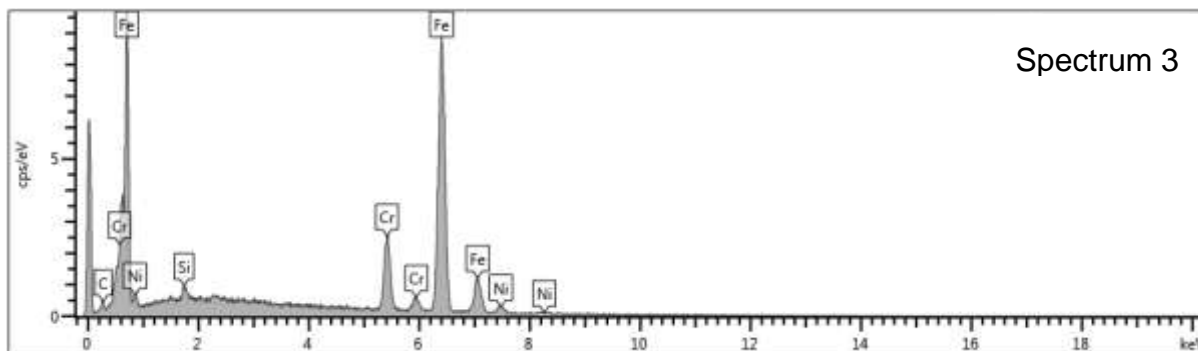
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – EDS do Substrato AISI 1020

Spectrum 3		
Elemento	% (Peso)	% (Peso) σ
C	2,26	0,31
Si	0,64	0,08
Cr	12,36	0,24
Fe	81,1	0,45
Ni	3,64	0,32
Total:	100	

Fonte: Autoria Própria.

Figura 56 – Espectro do Aço AISI 1020



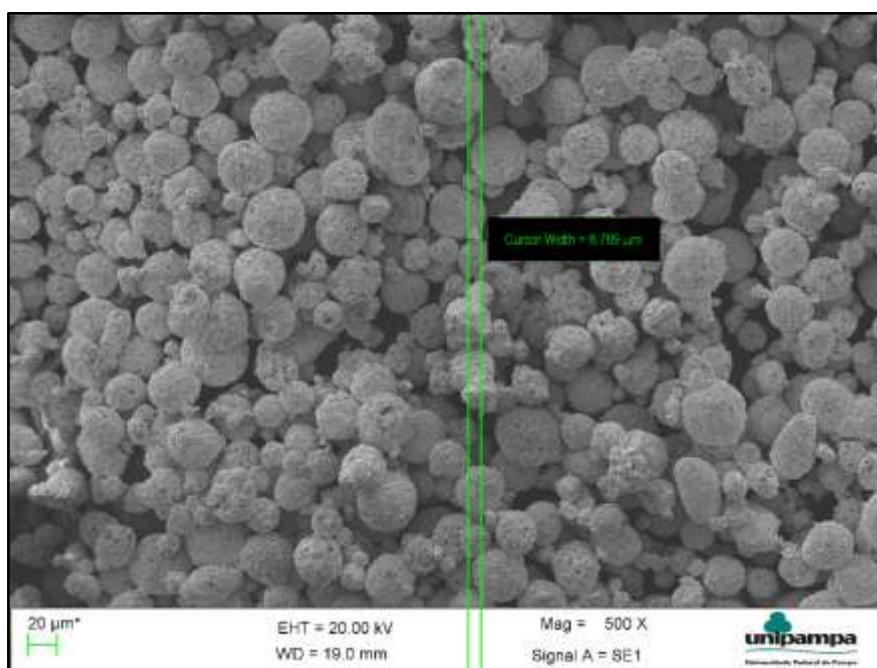
Fonte: Autoria Própria.

Como esperado, encontra-se elementos como Cr e Co em torno de 7% (Peso), no EDS do revestimento.

4.1.2 Morfologia do Pó Aspergido (WC)

A morfologia do pó de Carbetto de Tungstênio, através do M.E.V., pode ser observada na Figura 57, com uma magnitude de ampliação de 500X:

Figura 57 – Partículas de Carbetto de Tungstênio

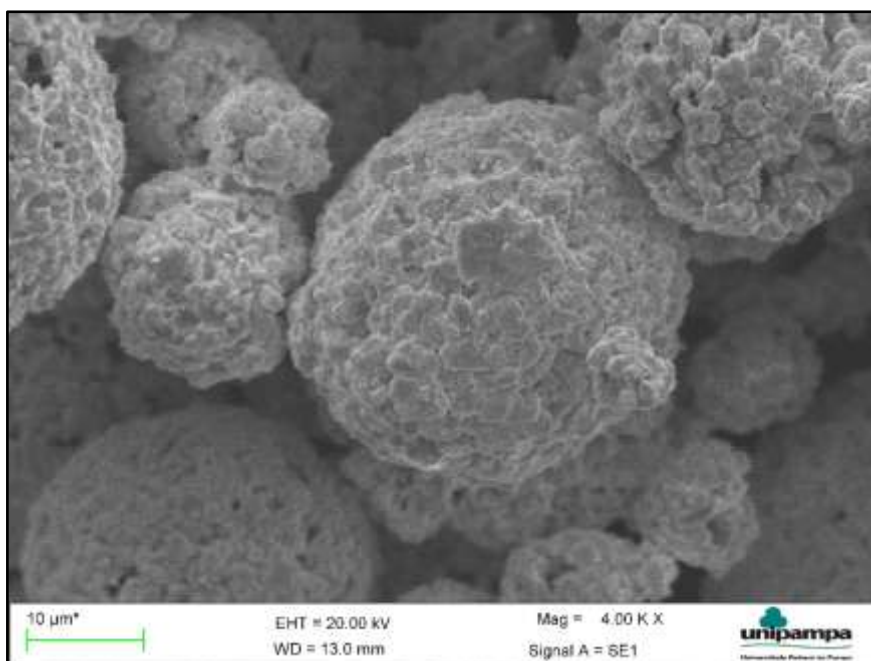


Fonte: Autoria Própria, 2016.

Como observado as partículas são uniformes, com diâmetro médio de $43\mu\text{m}$, que condiz com (LIMA e TREVISAN, 2007, p. 34), onde o tamanho das partículas de pó usado no processo HVOF é usualmente de 5 a $45\mu\text{m}$. A menor partícula encontrada na imagem acima, tem tamanho de $8,789\mu\text{m}$.

Observa-se na Figura 58, em uma magnitude de 4.000X, o aspecto poroso do WC (que aumenta a área efetiva superficial), tendo como resultado uma maior eficiência na troca térmica, no momento de sua aspersão pela pistola HVOF, em relação a uma superfície completamente lisa. Esta característica é de fundamental importância pelo fato do Tungstênio ser o elemento de maior ponto de fusão da tabela periódica:

Figura 58 – Aspecto superficial da partícula de WC



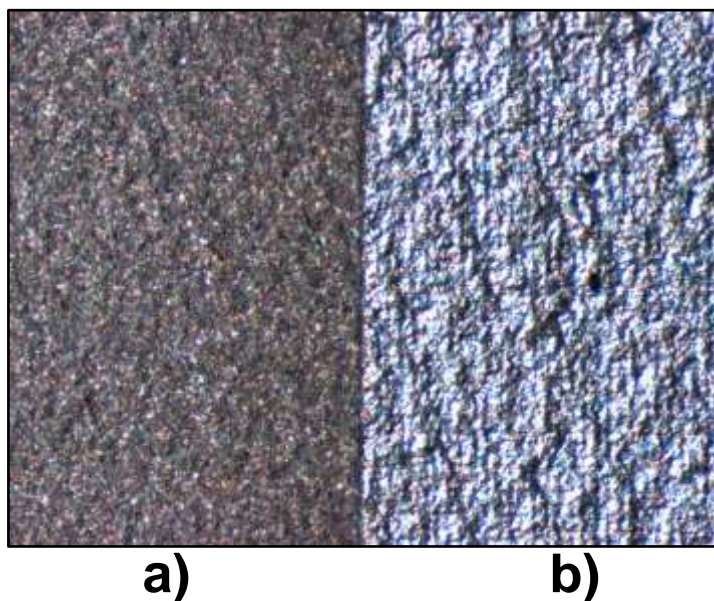
Fonte: Autoria Própria, 2016.

Elementos adicionados em pequena proporção, como Cromo e Cobalto, ajudam a baixar o ponto de fusão desta liga, atuando como ligantes entre partículas semifundidas de Tungstênio.

4.1.3 Microscopia Ótica

Na Figura 59 observa-se uma comparação entre a vista de topo da amostra a) Sem refusão a Laser e b) Com refusão a Laser:

Figura 59 – Ampliação 100X a) Antes de refusão a Laser; b) Após refusão a Laser



Fonte: Autoria Própria.

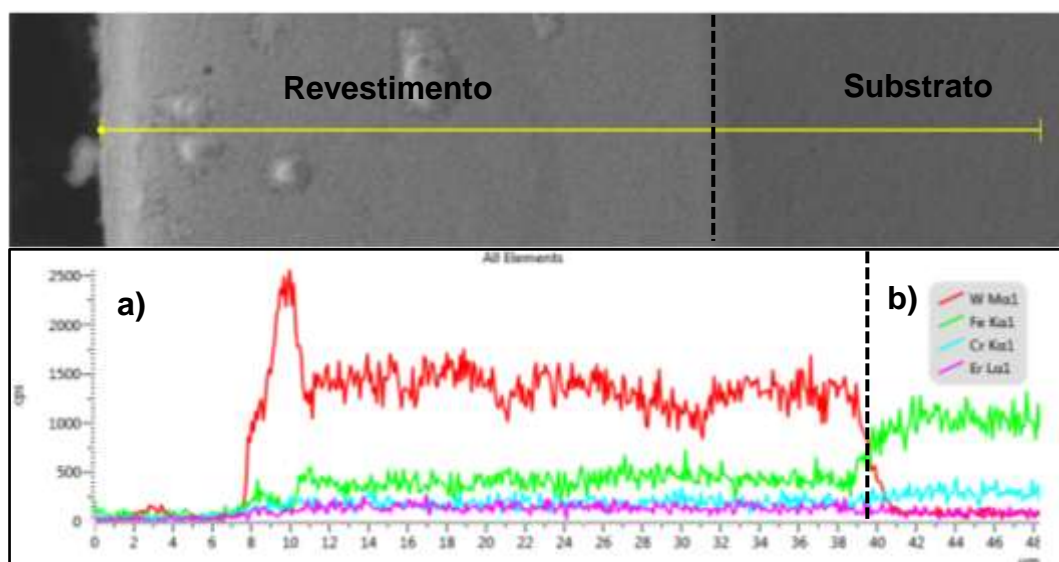
Observa-se como esperado, uma cor mais metalizada após a irradiação, devido ao sucesso na refusão e densificação do revestimento depositado por HVOF.

4.1.4 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Para o estudo da dispersão dos elementos na interface revestimento/substrato após a irradiação por Laser, realizou-se o teste de *Line Scan* (distribuição espacial de elementos químicos presentes na amostra, ao longo da linha da Figura 60).

Como esperado, o Tungstênio inicia com alta concentração na superfície do revestimento e se mantém constante até a interface com o aço AISI 1020, onde ocorre um decréscimo inversamente proporcional à concentração de Ferro. Essa transição ocorre num intervalo de $3\mu\text{m}$ e comprova uma ligação metalúrgica entre revestimento e substrato.

Figura 60 – *Line Scan* do Revestimento Refundido por Laser. a) Revestimento; b) Substrato



Fonte: Própria Autoria, 26/Jan/2017.

4.1.5 Perfilometria Superficial

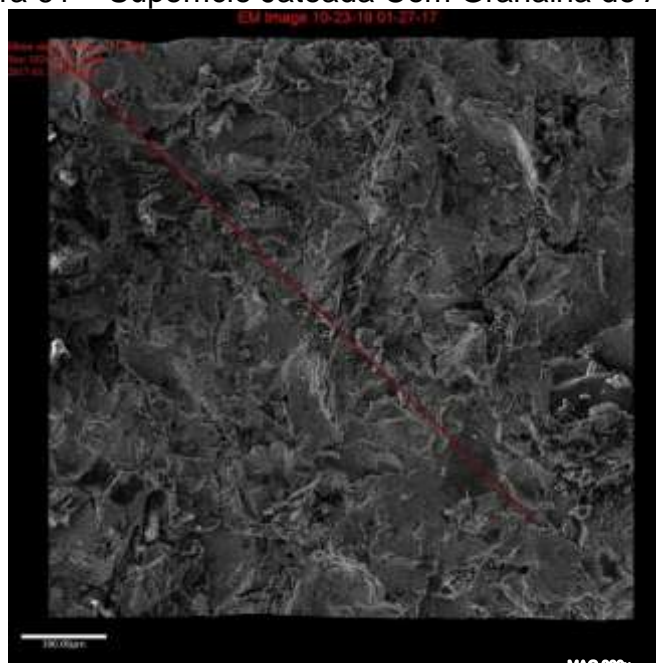
Considerando-se que um dos principais mecanismos de aderência do substrato é o de ancoramento mecânico, as superfícies a serem aspergidas devem ter rugosidade adequada. Para tanto apresenta-se a seguir a caracterização dessas superfícies.

- Perfilometria da Superfície Jateada com Alumina:

A primeira superfície analisada foi a jateada por granalha de alumina. Uma visão com magnificação de 300x pode ser vista na Figura 61, feita pelo MEV/FEG do INPE.

Os parâmetros analisados da superfície jateada com óxido de alumínio, estão dispostos na Tabela 11 e a amostra do perfil de rugosidade desta superfície no APÊNDICE C:

Figura 61 – Superfície Jateada Com Granalha de Alumina



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11 – Parâmetros de Rugosidade (Superfície Jateada Com Al_2O_3)

Superfície Jateada com Alumina			
Nome	Medição	Unidade	Descrição
R_a	1.88	μm	Perfil médio de Rugosidade
R_q	2.39	μm	Perfil de Rugosidade RMS (<i>Root-Mean-Square</i>)
R_t	14.19	μm	Pico Máximo do Perfil de Rugosidade
R_z	10.91	μm	Linha Média Entre Pico e Vale do Perfil de Rugosidade
R_{max}	13.27	μm	Linha Média Entre Pico e Vale do Perfil de Rugosidade Dentro de um Comprimento de Amostragem
R_p	6.85	μm	Pico Máximo de Altura do Perfil de Rugosidade
R_v	7.34	μm	Pico Máximo de Profundidade do Perfil de Rugosidade
R_c	8.48	μm	Altura Média das Irregularidades do Perfil de Rugosidade
R_{sm}	44.63	μm	Espaçamento Médio das Irregularidades do Perfil de Rugosidade
R_{sk}	-0.18		Fator de Assimetria (<i>Skewness</i>)
R_{ku}	3.27		Fator de Achatamento (<i>Kurtosis</i>)
R_{dq}	0.75		Inclinação RMS (<i>Root-Mean-Square</i>) do Perfil de Rugosidade
R_t/R_z	1.30		Valor de Pico do Perfil de Rugosidade, (≥ 1), Valores Altos Representam picos maiores
l	800.22	μm	Comprimento de amostragem (<i>Cut-Off</i>)
L_c	80.00	μm	LambdaC: Corte do Comprimento de Onda

Fonte: Autoria Própria.

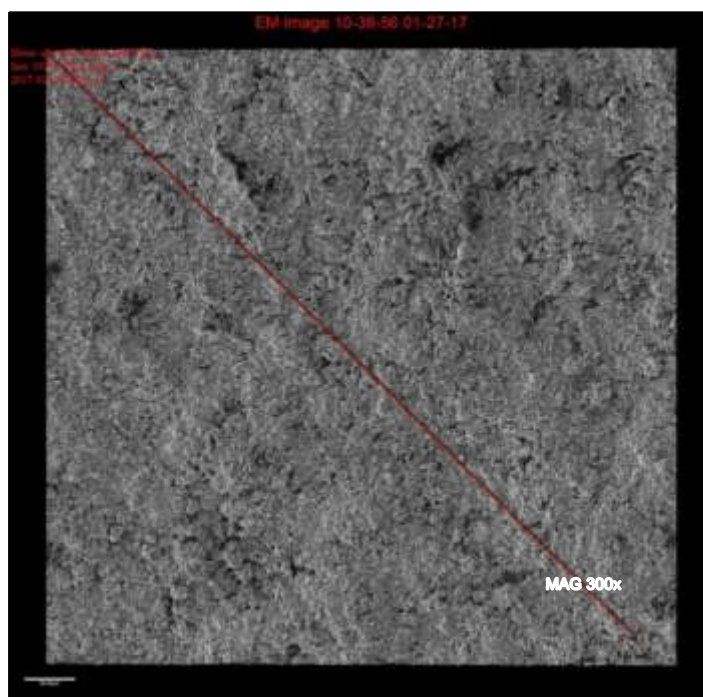
Pode-se inferir que segundo a AMERICAN WELDING SOCIETY (1985), o parâmetro de rugosidade média (Ra) visto na Tabela 11 está abaixo do recomendado de $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas do revestimento ($\sim 43\mu\text{m}$ de diâ.).

Como Ra está entre o intervalo de $(0,3 \sim 3)\mu\text{m}$, o comprimento mínimo de amostragem utilizado ($0,8\text{mm}$) está dentro da norma da ABNT NBR 6405 como visto na Tabela 5 do subcapítulo 2.3.3.

- Perfilometria da Superfície Aspergida com HVOF:

A segunda superfície analisada foi a aspergida com HVOF, como pode-se ver na Figura 62, também com uma magnificação de 300x. Os parâmetros analisados da superfície aspergida com HVOF, estão dispostos na Tabela 12 e a amostra do perfil de rugosidade desta superfície no APÊNDICE D:

Figura 62 – Superfície Aspergida com HVOF



Fonte: Autoria Própria.

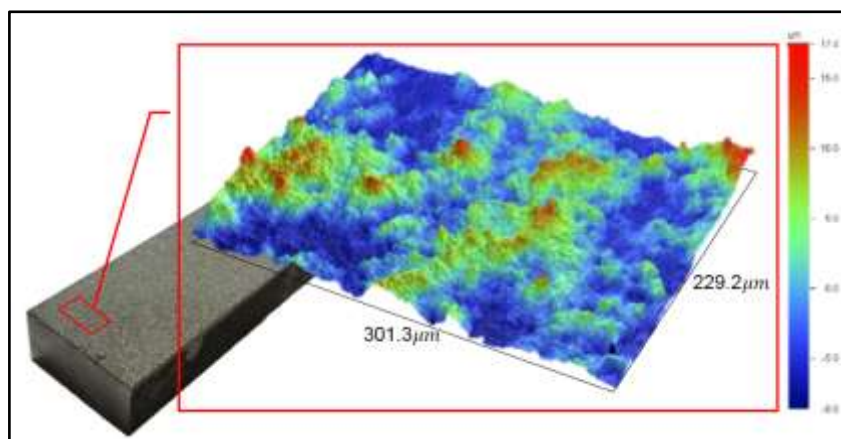
Tabela 12 – Parâmetros de Rugosidade (Superfície Aspergida com HVOF)

Superfície Aspergida com HVOF			
Nome	Medição	Unidade	Descrição
R _a	1.71	μm	Perfil médio de Rugosidade
R _q	2.14	μm	Perfil de Rugosidade RMS (<i>Root-Mean-Square</i>)
R _t	11.78	μm	Pico Máximo do Perfil de Rugosidade
R _z	8.91	μm	Linha Média Entre Pico e Vale do Perfil de Rugosidade
R _{max}	11.78	μm	Linha Média Entre Pico e Vale do Perfil de Rugosidade Dentro de um Comprimento de Amostragem
R _p	6.22	μm	Pico Máximo de Altura do Perfil de Rugosidade
R _v	5.56	μm	Pico Máximo de Profundidade do Perfil de Rugosidade
R _c	6.20	μm	Altura Média das Irregularidades do Perfil de Rugosidade
R _{sm}	32.16	μm	Espaçamento Médio das Irregularidades do Perfil de Rugosidade
R _{sk}	0.25		Fator de Assimetria (<i>Skewness</i>)
R _{ku}	2.96		Fator de Achatamento (<i>Kurtosis</i>)
R _{dq}	0.73		Inclinação RMS (<i>Root-Mean-Square</i>) do Perfil de Rugosidade
R _t /R _z	1.32		Valor de Pico do Perfil de Rugosidade, (≥ 1), Valores Altos Representam picos maiores
l	819.69	μm	Comprimento de amostragem (<i>Cut-Off</i>)
L _c	80.00	μm	LambdaC: Corte do Comprimento de Onda

Fonte: Autoria Própria.

Para uma melhor visualização da rugosidade tridimensional das amostras é mostrado na Figura 63, como exemplificação, um mapa tridimensional da superfície aspergida com HVOF:

Figura 63 – Rugosidade Tridimensional (Superfície Aspergida por HVOF)



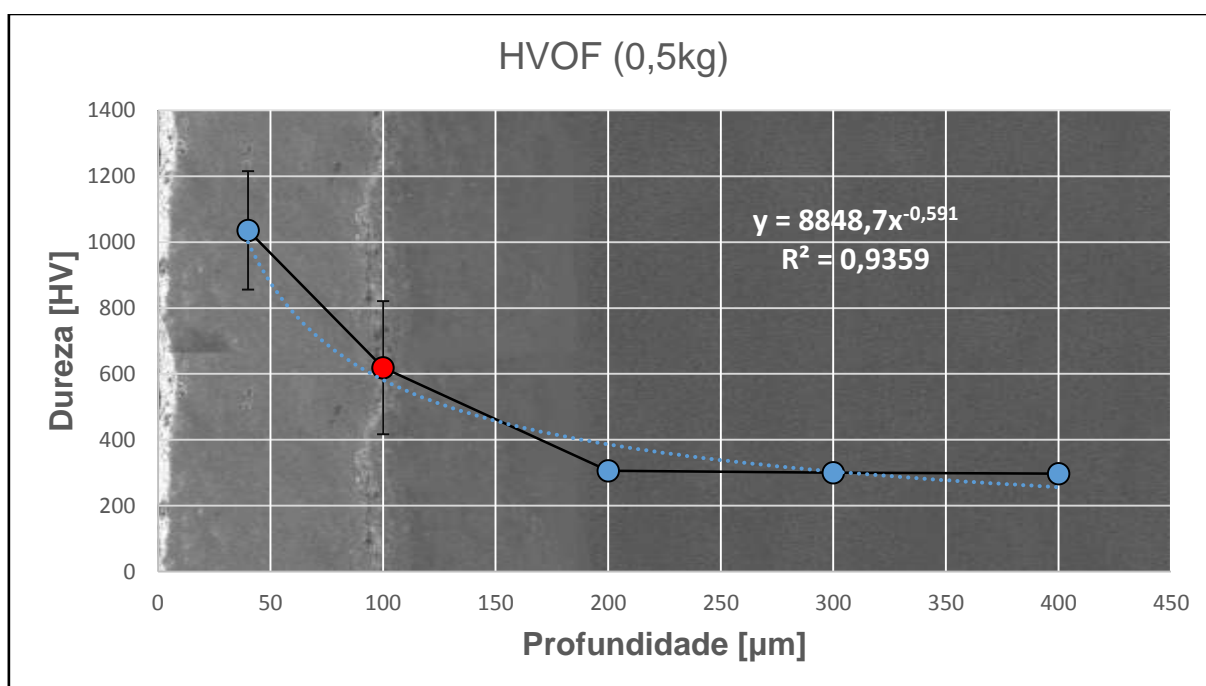
Fonte: Autoria Própria.

4.2 Dureza Por Microindentação

Neste subcapítulo será apresentado os dados de dureza por microindentação, realizado nas amostras de aspersão térmica com e sem refusão por Laser de CO₂.

É disposto na Figura 64 o gráfico de Dureza da amostra aspergida com HVOF, gerado pelos testes com microindentação, onde o ponto em vermelho representa a interface entre revestimento/substrato:

Figura 64 – Gráfico de Dureza Vickers vs. Profundidade da Secção Transversal (HVOF)

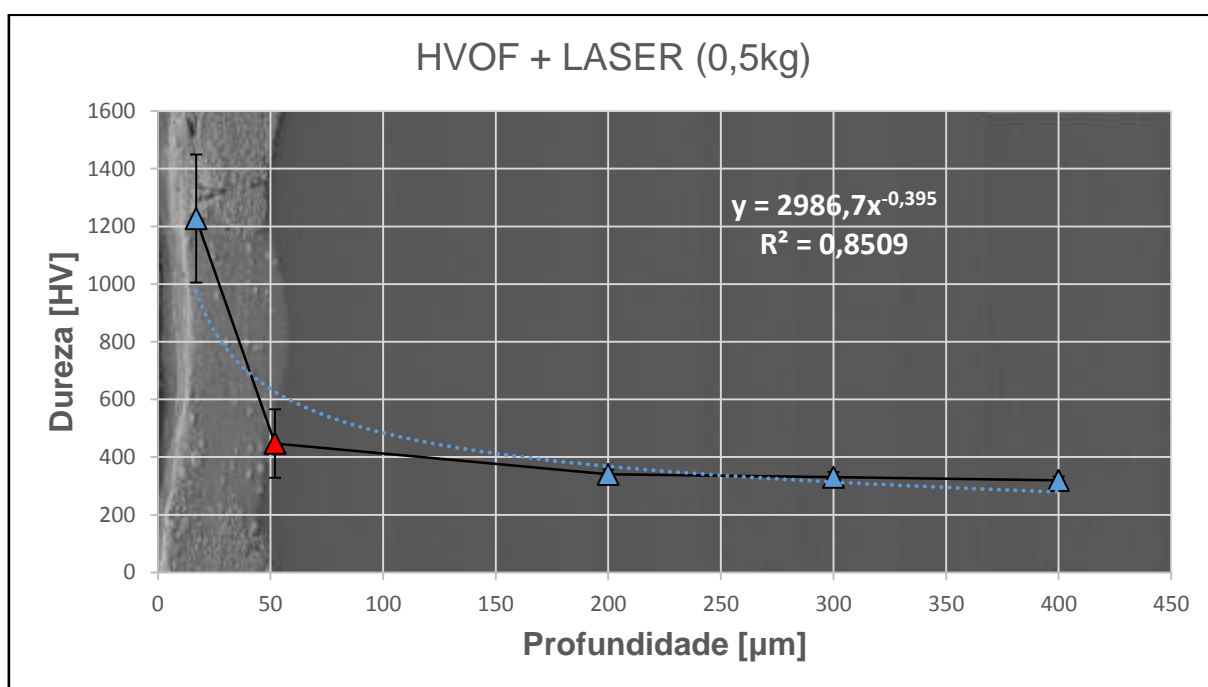


Fonte: Autoria Própria.

O APÊNDICE E apresenta as médias de dureza da amostra aspergida por HVOF. Já o APÊNDICE F apresenta os dados de dureza da amostra aspergida por HVOF + Irradiação por Laser.

Com os dados da APÊNDICE F é possível gerar o gráfico visto na Figura 65, onde o ponto em vermelho representa a interface entre revestimento/substrato:

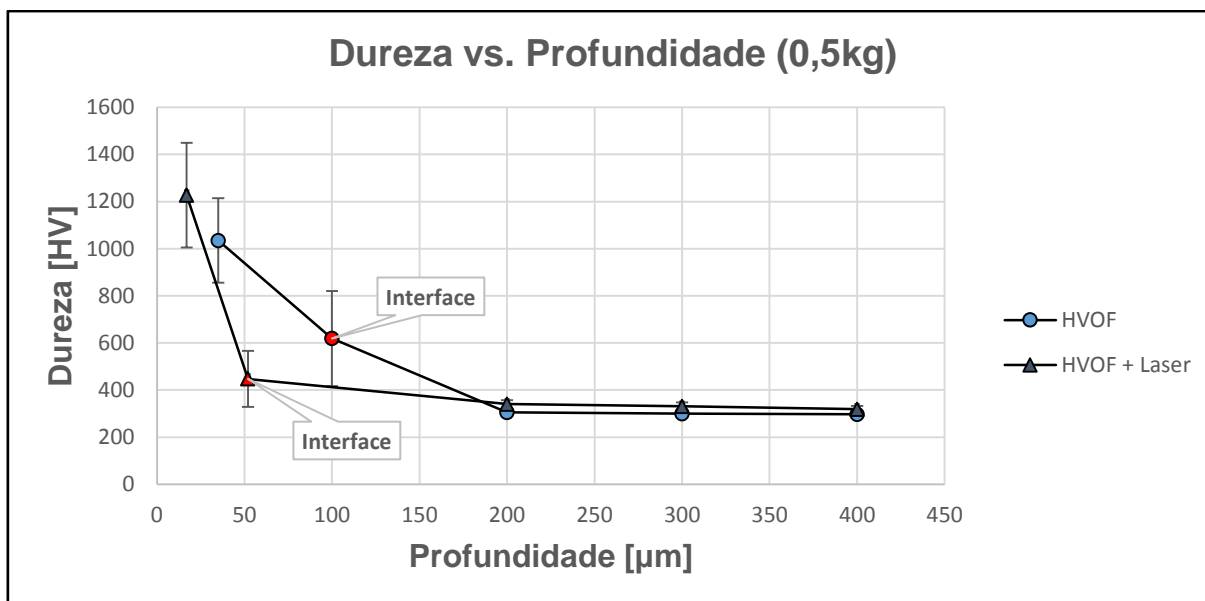
Figura 65 – Gráfico de Dureza Vickers vs. Profundidade da Secção Transversal (HVOF + Laser)



Fonte: Autoria Própria.

Um gráfico de cruzamento dos dados é então gerado para fins comparativos entre as duas amostras. Nota-se que a amostra que sofreu refusão com Laser de CO_2 teve uma densificação do revestimento, portanto sua interface tem espessura em torno dos $50\mu\text{m}$, como pode ser visto na Figura 66:

Figura 66 – Gráfico Comparativo de Dureza por Microindentação



Fonte: Autoria Própria.

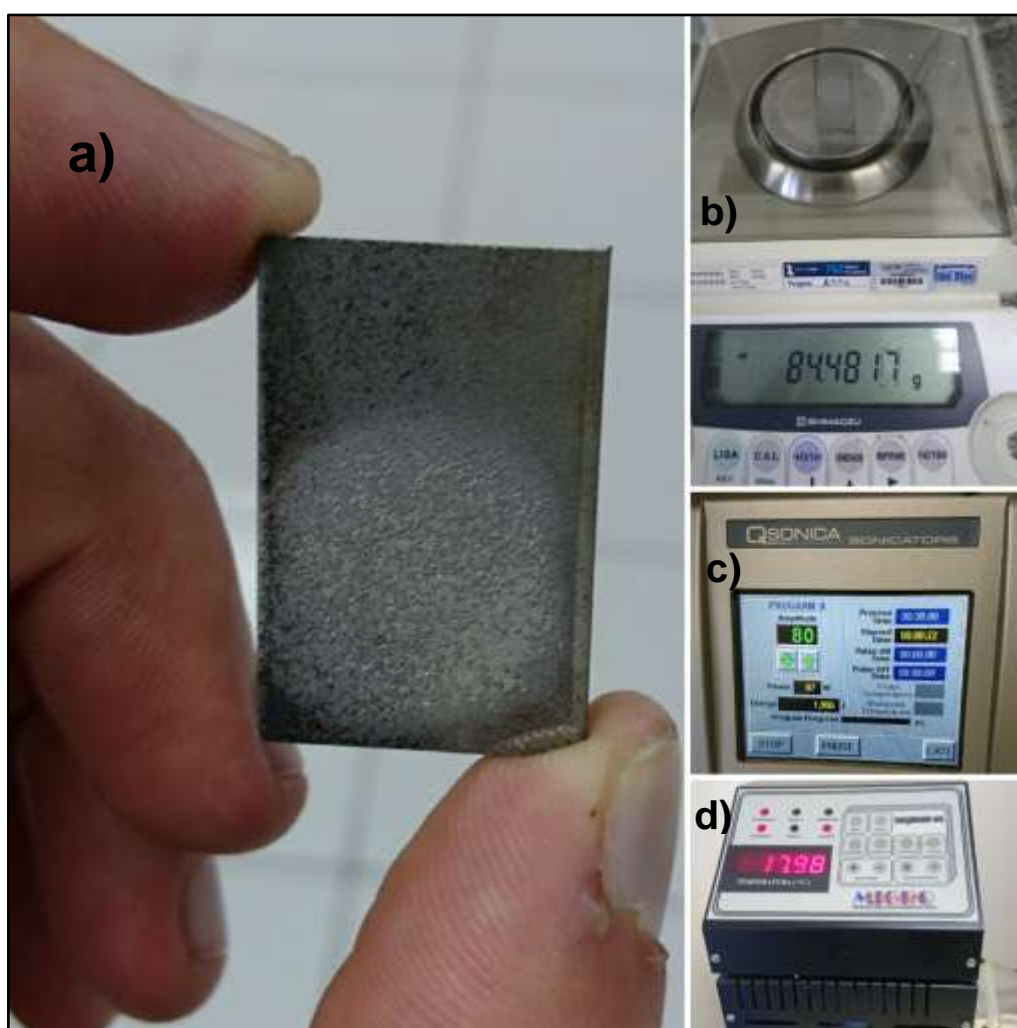
Os dados da Figura 66 apresentam resultados similares a (HASAN, WANG e BERNDT, 2014), no que diz respeito à queda de dureza na interface do revestimento com o substrato, mantendo-se constante em 300HV, a partir de 200µm.

4.3 Cavitação Por Ultrassom

Por fim foram realizados testes de desgaste por cavitação segundo a norma ASTM G32.

Pode-se ver na Figura 67, os efeitos visuais da erosão causada pela cavitação em a); a balança de precisão utilizado da marca SHIMADZU AUX220 em b); a unidade de controle dos parâmetros de cavitação em c) e a unidade de controle do arrefecimento em d):

Figura 67 – Teste de Cavitação

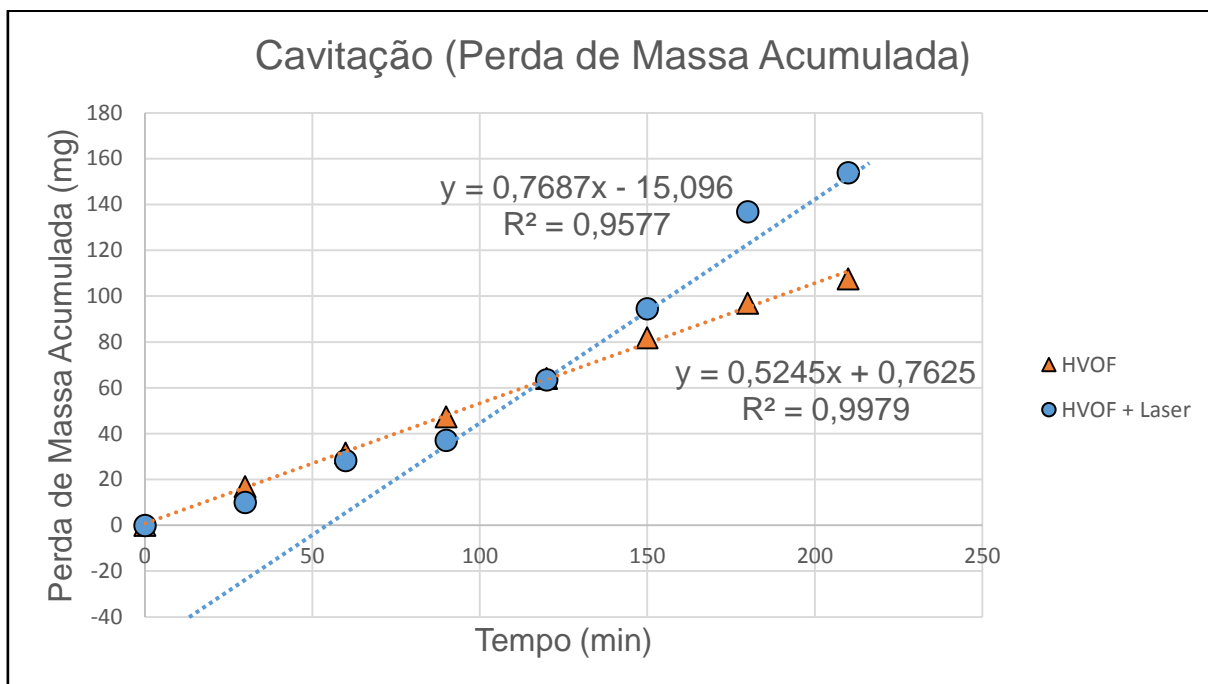


Fonte: Autoria Própria.

4.3.1 Comparativo de Resistência à Cavitação Entre as Amostras

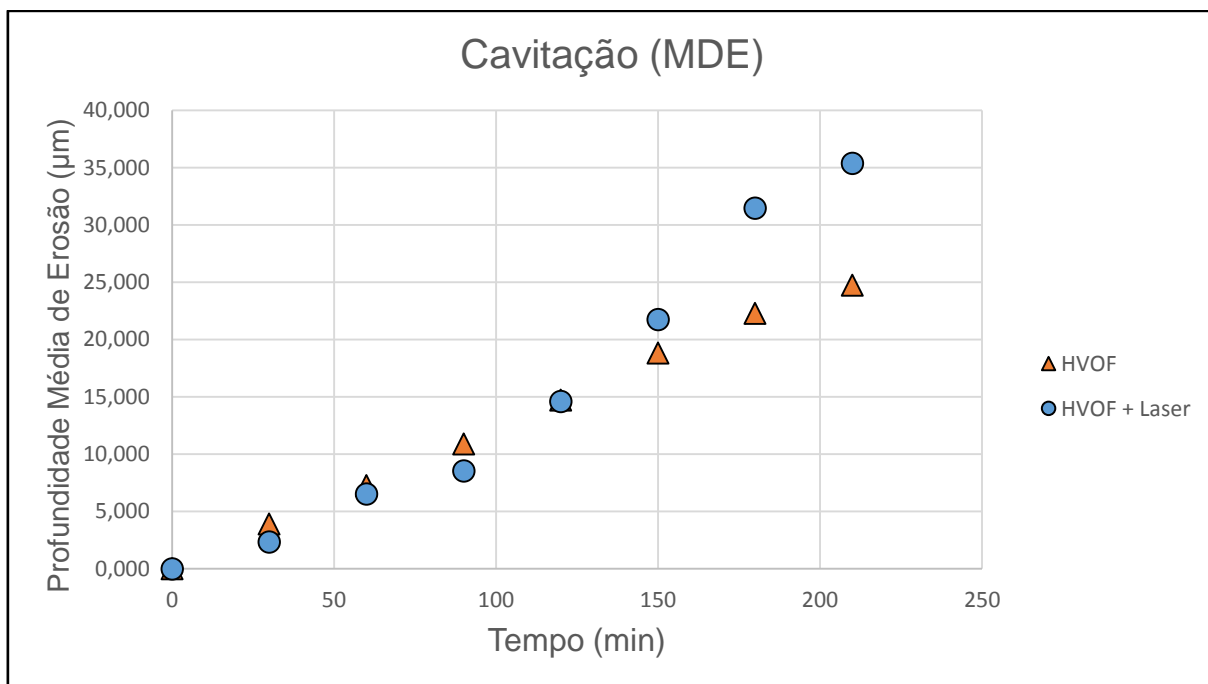
Os gráficos da Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71, foram construídos a partir dos dados do APÊNDICE G e H; dizem respeito aos testes em amostras aspergidas por HVOF comparadas às amostras posteriormente refundidas com Laser de CO₂:

Figura 68 – Perda de Massa Acumulada



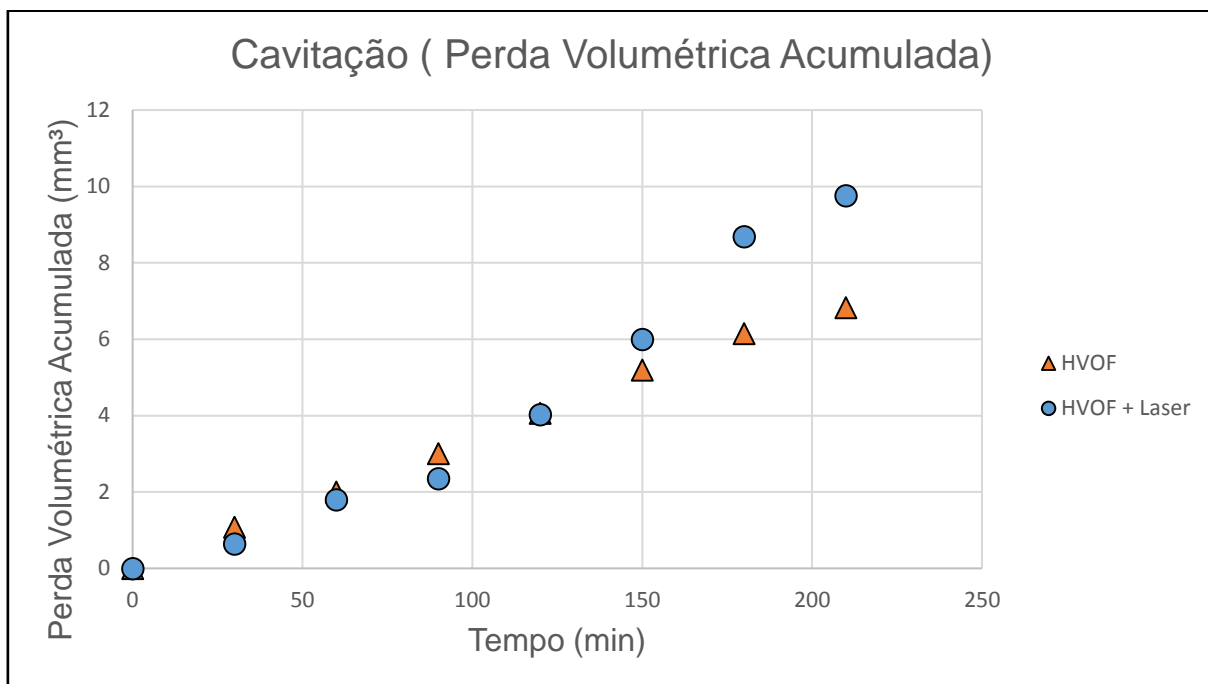
Fonte: Autoria Própria.

Figura 69 – Profundidade Média de Erosão [MDE]



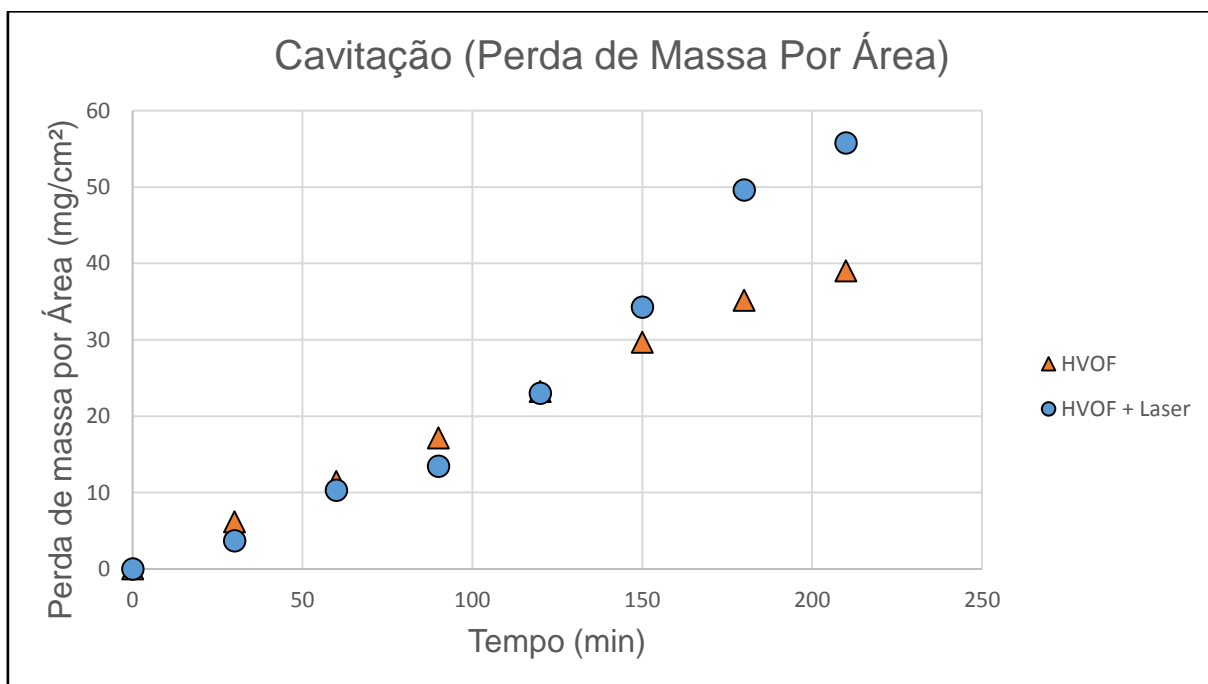
Fonte: Autoria Própria.

Figura 70 – Perda Volumétrica Acumulada



Fonte: Autoria Própria.

Figura 71 – Perda de Massa Por Área



Fonte: Autoria Própria.

Seguindo recomendações da norma ASTM G32, a partir da interpolação linear da Figura 68, pode-se descobrir o tempo de incubação, período de tempo em que ocorre perda de massa significativa, igualando $y=0$ em ambas as equações. Assim temos que a interceptação da reta com o eixo X ocorre em:

$$t_0 = -1,454min \text{ (Para amostras apenas com HVOF);}$$

$$t_0 = 52,015min \text{ (Para amostras com HVOF + Laser).}$$

Ou seja, a amostra aspergida com HVOF possui tempo de incubação nulo, perdendo massa desde o primeiro instante, quando submetido à cavitação. A formação de trincas é o principal mecanismo de perda de massa de materiais frágeis, não havendo este período de incubação segundo (PUKASIEWICZ, 2008, p. 8).

Já a amostra aspergida com HVOF e posteriormente refundida com Laser de CO_2 possui tempo de incubação de 52 minutos, se mostrando mais resistente ao início de perda de massa por cavitação.

A taxa máxima de erosão por cavitação, para amostras aspergidas com HVOF é de $0,5245 \text{ mg/min}$.

Já a taxa máxima de erosão por cavitação da amostra de HVOF + Refusão por Laser é de $0,9579 \text{ mg/min}$.

4.3.2 Comparação de Resistência à Cavitação Entre Materiais

Com os resultados obtidos dos testes de cavitação nas amostras, foi possível através da interpolação linear realizada, comparar a resistência à cavitação com outros materiais já estudados pelo mesmo método.

Esta comparação pode ser vista na Tabela 13, com alguns materiais extraídos de Boy, Kumar; et al. (1997).

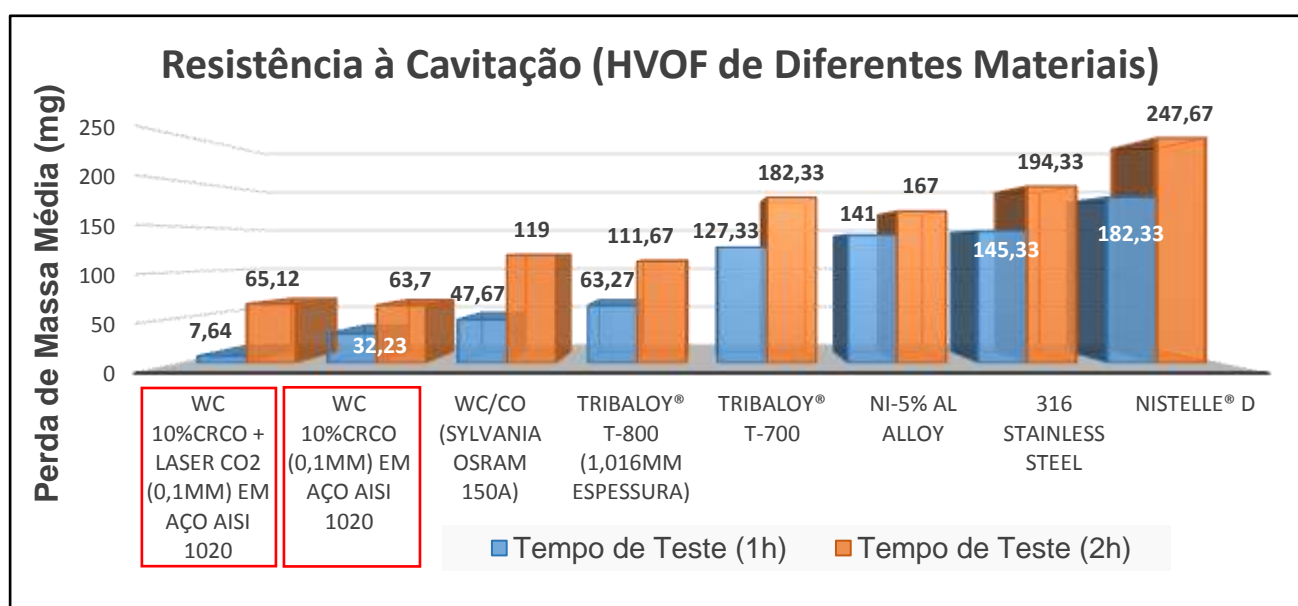
Tabela 13 – Comparação Entre o Material Estudado e outros Materiais Aspergidos por HVOF (Resistência à Cavitação)

Material	Perda de massa média (mg) 60min.	Perda de massa média (mg) 120min.
WC 10%CrCo + Refusão Via Laser CO2 (0,1mm) em Aço AISI 1020	7,64	65,12
WC 10%CrCo (0,1mm) em Aço AISI 1020	32,23	63,70
WC/Co (Sylvania Osram 150A)	47,67	119,00
Tribaloy® T-800 (1,016mm espessura)	63,27	111,67
Tribaloy® T-700	127,33	182,33
Ni-5% Al Alloy	141,00	167,00
316 Stainless Steel	145,33	194,33
Nistelle® D	182,33	247,67

Fonte: Adaptado de (BOY, KUMAR, et al., 1997, p. 49).

Para os dados da Tabela 13 é possível criar um histograma de perda de massa para cada classe de materiais, com tempos de teste em cavitação ultrassônica de uma e duas horas, onde as amostras estudadas estão destacadas em vermelho na Figura 72.

Figura 72 – Resistência à Cavitação Entre as Amostras Testadas e Outros Materiais



Fonte: Autoria Própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas observações foram feitas após a análise dos resultados, dentre elas a grande perda na espessura da camada aspergida por HVOF durante a irradiação do Laser de CO₂, de 100µm para 35 µm (redução de 65% em espessura do revestimento). Acredita-se que em parte devido a densificação do Carbetto de Tungstênio, mas também pela evaporação de elementos mais voláteis como o Cromo e Cobalto com as altas temperaturas atingidas no foco do Laser, o que pode justificar a menor concentração desses elementos na análise por EDS do revestimento, que deveriam ser em torno de 10% (WC 10% Co Cr).

Houve sucesso na refusão do revestimento, como pôde-se observar na microscopia ótica, indicando uma ligação metalúrgica na interface entre o revestimento e o aço AISI 1020. Este pressuposto foi comprovado na análise de *Line Scan* por EDS.

Como esperado há uma semelhança aparente entre a queda na concentração de Carbetto de Tungstênio e a redução de dureza, comparando dados do *Line Scan* por EDS e resultados de Dureza por microindentação. Uma maior dureza superficial das amostras irradiadas com Laser em comparação às aspergidas por HVOF pode indicar níveis de óxidos em maiores concentrações nas amostras irradiadas, resultado da elevação da temperatura durante a refusão. Melhores resistências à cavitação foram encontradas nos parâmetros com redução de óxidos, no estudo de Pukasiewicz (2008).

O polimento das amostras irradiadas via Laser de CO₂, submetidas à cavitação não foi suficiente, pois a espessura do revestimento era muito pequena. Caso o polimento fosse completo, a camada aspergida seria totalmente removida, restando apenas o substrato de aço AISI 1020. O polimento superficial interferiu nos resultados de resistência à cavitação, pois como citado na revisão bibliográfica o Carbetto de Tungstênio tem uma baixa resistência à fratura K_{IC} , fazendo com que micro trincas superficiais se propaguem rapidamente. A seção 12.2 da (ASTM INTERNATIONAL, 2010, p. 11) também ressalta a importância de um bom acabamento superficial para a realização dos ensaios.

Por fim a amostra aspergida com HVOF teve um tempo de incubação nulo, enquanto a irradiada via Laser esse tempo foi de quase uma hora. Acredita-se que isso se deva em parte pela redução da espessura do revestimento frágil, fazendo com que o substrato dúctil de aço AISI 1020, absorvesse boa parte da energia dissipada pela cavitação em forma de deformação elástica. Apesar disso, a amostra que passou pelo processo de refusão via Laser da superfície, apresentou uma taxa de erosão 1,8x maior do que a sem refusão (apenas HVOF).

Ambas as amostras, com e sem refusão a Laser, obtiveram ótimos resultados se comparado a outros materiais comerciais também aspergidos via HVOF, como observado na Figura 72.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se comparar dados da frequência de cavitação de uma turbina real descritos por (ESCALER, EGUSQUIZA, *et al.*, 2006), (SANTA, ESPITIA, *et al.*, 2009) e (LINHARES, 2011), na taxa de perda de massa acumulada encontrada neste trabalho.

No caso das análises realizadas com cavitação ultrassônica, sugere-se um tempo maior de ensaio, para o estudo das fases de perda de massa das amostras, pois acredita-se que as três horas e meia de ensaio não foram suficientes para que a cavitação entrasse em regime estacionário (saísse da região linear de perda de massa).

Caso o autor futuro decida continuar na pesquisa de tratamento térmico de metais com Laser em revestimentos aspergidos, sugere-se o aumento da camada aspergida de 100microns para 150microns, evitando que a densificação e evaporação causada pela irradiação via Laser diminua muito a espessura do revestimento, causando futuros problemas no polimento superficial.

Comprovar os resultados da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), através de análises por Difração de Raios X (DRX).

7 REFERÊNCIAS

AKHATOV, I. . O. et al. **Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble.** "Physics of Fluids. [S.l.], p. 2805-2819. 2001.

ALTAIR ENGINEERING, INC. Centrifugal Pump Calculator. **CFD Calc.™**, 2015. Disponível em: <<http://www.centrifugalpumpcalculator.com/>>. Acesso em: 3 Novembro 2016.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal spraying: practice, theory and application.** AWS. Miami, p. 184. 1985.

ASM. **Failure Analysis and Prevention.** 5th ed. ed. [S.l.]: ASM International Handbook Committee, v. 11, 2008.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.** 10ª. ed. Ohio: Materials Park, v. I, 2010.

ASM MATERIALS INFORMATION. Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation. **ASM Handbooks Online**, 2015. Disponível em: <<http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>>. Acesso em: 01 Novembro 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: Rugosidade das Superfícies.** Rio de Janeiro, p. 9. 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **G32: Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus.** ASTM Standards. West Conshohocken, p. 19. 2010.

BCC RESEARCH. Powder Metallurgy: Technologies and Global Markets. **bcc Research**, 2016. Disponível em: <<http://www.bccresearch.com/market-research/chemicals/advanced-technologies-paints-coatings-report-chm049e.html>>. Acesso em: 12 Janeiro 2017.

BOY, J. H. et al. **Cavitation- and Erosion-Resistant Thermal Spray Coatings.** US Army Corps of Engineers. Champaign, Illinois, p. 146. 1997.

BUEHLER® SUMMET™. **The Sum Of Our Experience A Guide to Materials Preparation & Analysis.** 2ª. ed. Lake Bluff: Worldwide Headquarters, 2013.

CAHABA MEDIA GROUP. Extend Asset Value by Applying Protective Coatings to Pump Wet Ends. **PUMPS & SYSTEMS**, 2015. Disponível em:

<<http://www.pumpsandsystems.com/pumps/march-2016-extend-asset-value-applying-protective-coatings-pump-wet-ends>>. Acesso em: 3 Novembro 2016.

CANAVELIS, R. **Contribution à l'étude de l'erosion de cavitation das les turbomachines hydrauliques. Bulletin de la direction des études et recherches.** [S.l.]: [s.n.], 1967.

CRAFER, R.; OAKLEY, P. J. **Laser Processing in Manufacturing.** 1ª. ed. London: Springer, 2013.

DEP. DE GEOLOGIA - UFOP. Microscopia Eletrônica - JEOL 5510. **Degeo**, 2017. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 20 Janeiro 2017.

ESCALER, X. et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 20 Janeiro 2006. 983–1007.

FUNDAÇÃO RICARDO FRANCISCO. Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG) de Materiais Nanoestruturados. **RF IME (Fundação Ricardo Francisco)**, 2013. Disponível em: <<http://www.frf.br/website/realizacoes/144-microscopia-eletronica-de-varredura-com-emissao-de-campo-mev-feg-de-materiais-nanoestruturados>>. Acesso em: 10 Maio 2017.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** São Paulo: Atlas, 1999.

HASAN, M. F.; WANG, J.; BERNDT, C. Evaluation of the mechanical properties of plasma sprayed hydroxyapatite coatings. **Applied Surface Science (ELSEVIER)**, p. 155-162, Março 2014.

HENN, É. A. L. **Máquinas de Fluxo.** 2ª. ed. Santa Maria: ufsm, 2006.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 6ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

INTERNATIONAL THERMAL SPRAY ASSOCIATION. What it is. **AWS INTERNATIONAL THERMAL SPRAY ASSOCIATION**, 2017. Disponível em: <<http://thermalspray.org/>>. Acesso em: 12 Janeiro 2017.

KLASSEN, D. T. HVOF Spritzsysteme. **HSU Hamburg (Helmut Schmidt Universität)**, 2007. Disponível em: <<http://www.hsu->

hh.de/werkstoffkunde/index_8BBNpQHopSQm5Ply.html>. Acesso em: 15 Novembro 2016.

LIMA, C. C.; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica**. 2ª. ed. São Paulo: Artliber, 2007.

LIMA, M. S. F. **Curso de Aplicações Industriais de Lasers**. Instituto de Estudos Avançados (IEAv). São José dos Campos, p. 12. 2015.

LINHARES, A. D. **Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 91. 2011.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2008.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MAFTOUM, R. D. A. **INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO ADICIONADO POR SHTPN NA RESISTÊNCIA À EROÇÃO POR CAVITAÇÃO DO AÇO INOXÍDAVEL MARTENSÍTICO**. UTFPR. Curitiba, p. 14. 2012. (CDD (22. ed.) 620.1).

MAXJATO. Óxido de Alumínio. **Max Jato Soluções Para Jateamento**, 2014. Disponível em: <<http://maxjatosc.com.br/service/oxido-de-aluminio/>>. Acesso em: 17 Maio 2017.

MCALLISTER, E. W. **Pipeline Rules of Thumb Handbook**. 7ª. ed. New York: Gulf Professional Publishing, 2009.

MTS. Tungsten. **MTS (Midwest Tungsten Service)**, 2017. Disponível em: <<https://www.tungsten.com/materials/tungsten/>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2017.

OXFORD INSTRUMENTS. SDD Detector for TEM: X-MaxN 80 T. **OXFORD Instruments (The Business of Science)**, 2017. Disponível em: <<https://www.oxford-instruments.com/products/microanalysis/energy-dispersive-x-ray-systems-eds-eds-for-tem/sdd-detector-for-tem>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2017.

PAREDES, R. S. C. ASPERSÃO TÉRMICA. In: _____ **ASPERSÃO TÉRMICA**. Curitiba: [s.n.], 2009. Cap. 4, p. 59.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

PEJEYD, L. et al. Residual stresses as a factor in the selection of tungsten carbide coatings for a jet engine application. **Journal of Thermal Spray Technology**, n. 4, p. 268-74, Setembro 1995.

PITA, G. R. S. et al. Irradiação a Laser de CO₂ de Revestimentos de NiCrAlY Depositados Via HVOF. **V SCTI - Anais do V Simpósio de Ciência e Tecnologia do IEAv**, São José dos Campos, Novembro 2016. 40-45.

PUKASIEWICZ, A. G. M. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspensão ASP**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 164. 2008.

QSONICA SONICATORS. **Ultrasonic Liquid Processors**. Newtown, Connecticut: [s.n.], 2017.

RIBAS, H. I. **RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE METAIS DUROS SEM COBALTO**. UFSC. Florianópolis, p. 12. 1991.

RICHMAN, R. H.; MCNAUGHTON, W. P. Correlation of cavitation-erosion behavior with mechanical properties of metals, v. 140, n. 1^a, p. 63-82, 1990.

RIJEZA. Carboneto de Tungstênio. **RIJEZA Metalurgia**, 2016. Disponível em: <<http://www.rijeza.com.br/revestimentos/revestimentos-metalicos/carboneto-de-tungstenio>>. Acesso em: 16 Novembro 2016.

RINOXI STEEL INDUSTRIES. Featured Products. **RSI (Rinox Steel Industries)**, 2015. Disponível em: <<http://www.rinoxisteel.com/>>. Acesso em: 17 Maio 2017.

SANTA, J. F. et al. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. **Wear**, 2009. 160–167.

SHIMADZU CORPORATION. **Shimadzu Analytical Balance Instruction Manual**. Analytical & Measuring Instruments Division. Kyoto Japan, p. 106. 2017.

SILVA, A. F. D. **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DA APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS COM LASER DE CO₂ EM ATMOSFERA AMBIENTE EM AÇO AISI 52100**. ITA. São José dos Campos, p. 2. 2010.

SPRAY, J. G. Shocking rocks by cavitation and bubble implosion. **Geology**, ago. 1999. p. 695.

STEEN, W. M.; MAZUNDER, J. **Laser Material Processing**. 4^a. ed. London: Springer, 2010.

SULZER LTD. Bombas centrífugas de simples estágio divididas axialmente e com dupla hélice Z22. **SULZER**, 2015. Disponível em: <<https://www.sulzer.com/pt/Products-and-Services/Pumps-and-Systems/Axially-Split-Pumps/Z22-Double-Suction-Axially-Split-Single-Stage-Centrifugal-Pumps>>. Acesso em: 03 Novembro 2016.

SYNRAD. Evolution Series Lasers. **Synrad**, 2016. Disponível em: <<http://www.synrad.com/evolution/evo125.htm>>. Acesso em: 16 Novembro 2016.

TELEGINSKI, V. **Deposição de Revestimentos com laser de CO2 para proteção térmica de palhetas de turbinas aeronáuticas e industriais**. Tese de Doutorado em Física e Matemática Aplicadas - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 85. 2016.

THE PHYSICS CLASSROOM. Momentum Conservation Principle. **the Physics Classroom**, 2014. Disponível em: <<http://www.physicsclassroom.com/class/momentum/Lesson-2/Momentum-Conservation-Principle>>. Acesso em: 30 Outubro 2016.

THORPE, M. L. Thermal spray : Industry in transition. **Advanced Materials and Processes**, United States, v. 143:5, Maio 1993. ISSN 6345768.

TRUMPF BRASIL. Laser de CO2 - Alta Potência. **http://www.br.trumpf.com/**, 2016. Disponível em: <<http://www.br.trumpf.com/pt/produtos/tecnologia-laser/produtos/laser-de-co2.html>>. Acesso em: 16 Novembro 2016.

VECCO. Wyko NT1100 Optical Profiling System (Quantitative 3D Topography for Research and Low-Volume Production). **Veeco**, Arizona, p. 2, 2002. Disponível em: <www.veeco.com>. Acesso em: 20 Maio 2017.

WILLIAMS, P. R. . P. M. W. E. S. W. J. B. A technique for studying liquid jets formed by cavitation bubble collapse under shockwaves, near a free surface. In: _____ **J. Non-Newtonian Fluid Mech.** [S.l.]: [s.n.], 1997. p. 101-110.

8 APÊNDICES

APÊNDICE A – Parâmetros do Laser Contínuo

Laser com Feixe Contínuo									
Amostra nº	1ª Aplicação			2ª Aplicação			3ª Aplicação		
	V (mm/s)	P (%)	Resolução	V (mm/s)	P (%)	Resolução	V (mm/s)	P (%)	Resolução
1	100	50	300	50	100	300	-	-	-
	--								
2	100	50	300	50	100	300	-	-	-
	--			--					
3	100	50	300	50	100	127	-	-	-
	--								
4	100	50	300	50	100	127	-	-	-
	--			--					
5	100	50	300	50	100	127	200	100	127
	--			--					
6	100	50	300	50	100	127	400	100	127
	--			--					

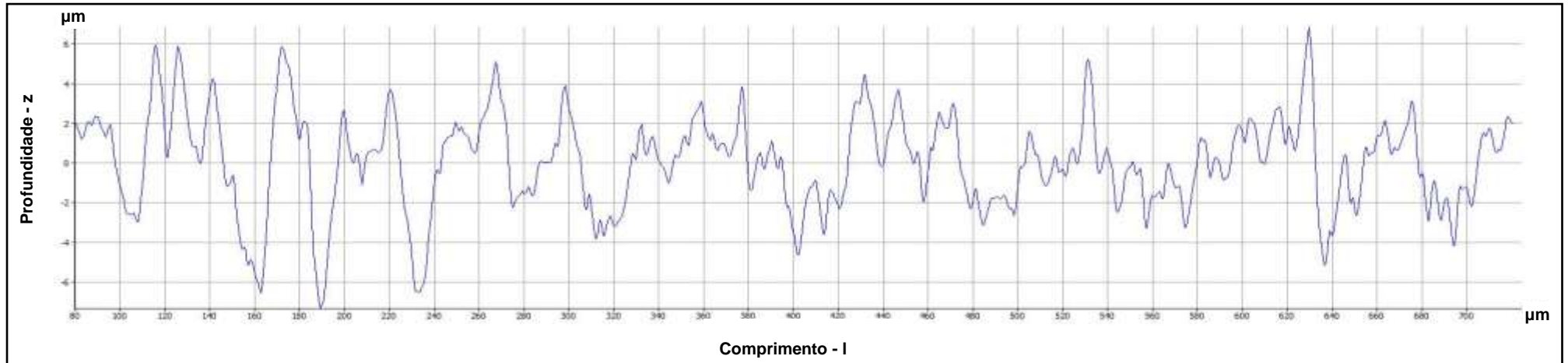
Fonte: Dr. Getúlio de Vasconcelos, IEAv, 2016.

APÊNDICE B – Parâmetros do Laser Pulsado

Laser Pulsado (SPOT)									
Amostra nº	1ª Aplicação			2ª Aplicação			3ª Aplicação		
	Spot mark	P (%)	Resolução	Spot mark	P (%)	Resolução	Spot mark duration	P (%)	Resolução
1	10	100	300	25	100	127	-	-	-
	--								
2	10	100	300	10	100	300	-	-	-
3	10	100	300	25	100	127	10	100	300
	--						--		
4	10	100	300	10	100	300	10	100	300
5	10	100	300	10	100	127	10	100	300
6	10	100	300	45	100	127	10	100	300
							-		

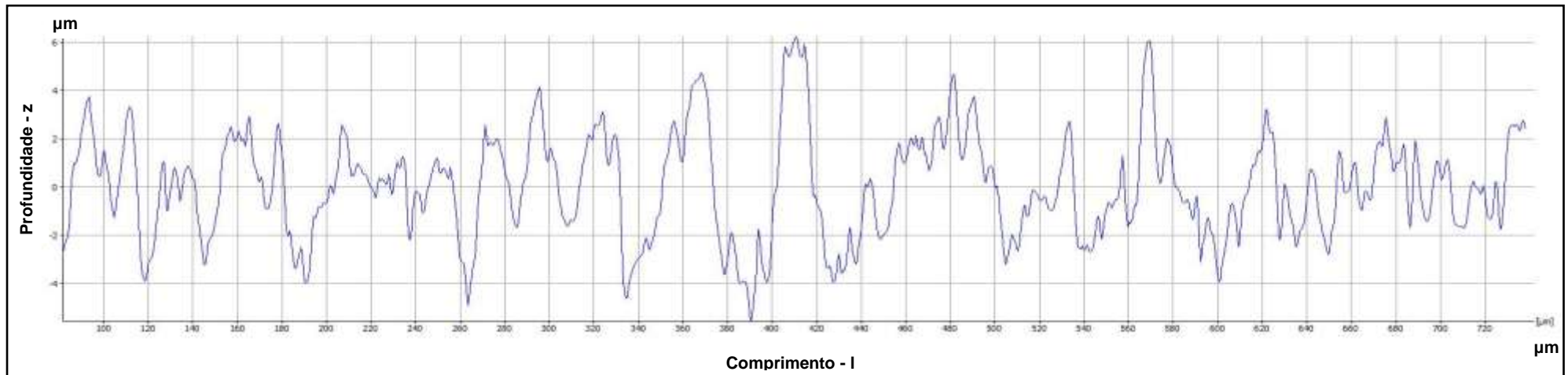
Fonte: Dr. Getúlio de Vasconcelos, IEAv, 2016.

APÊNDICE C – Perfil de Rugosidade da Superfície Jateada com Granalha de Alumina



Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE D – Perfil de Rugosidade da Superfície Aspergida com HVOF



Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE E – Dureza Por Microindentação (HVOF)

TESTE DE MICRODUREZA (HVOF)			
TUKON 1102			
Data	19/05/2017	Hora	16:10:21
Escala de Ensaio	HV0.5		
Tempo de Permanência	10 s		
Força de Ensaio	500 gf		
Valores Médios			Nº de Medições
Profundidade [um]	Dureza [HV]	Desvio Padrão Dureza	
35	1035,43	179,42	61
100	618,88	201,68	75
200	305,92	11,47	93
300	300,14	9,48	69
400	297,88	12,93	72

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE F – Dureza por Microindentação (HVOF + Refusão com Laser)

TESTE DE MICRODUREZA (HVOF + Laser)			
TUKON 1102			
Data	16/05/2017	Hora	14:59:12
Escala de Ensaio	HV0.5		
Tempo de Permanência	10 s		
Força de Ensaio	500 gf		
Valores Médios			Nº de Medições
Profundidade [um]	Dureza [HV]	Desvio Padrão Dureza	
17	1227,39	222,21	60
52	447,34	118,92	87
200	340,26	17,23	92
300	330,71	17,48	110
400	319,51	12,81	98

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE G – Cavitação de Amostras Aspergidas por HVOF

Tempo (min)	Peso das Amostras & Média (g)				Variação	Perda de Massa Acumulada (mg)	Profundidade Média de Erosão [MDE] (µm)	Perda em Volume (mm³)	Perda por Área (mg/cm²)	Temp. da água °C	Profundidade de teste (mm)
	x1	x2	x3	x4							
0	84,5634	84,5636	84,5638	84,5638	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	18 ± 2	12 ± 4
	84,5637										
30	84,5463	84,5468	84,5467	84,5468	0,0170	17,000	3,905	1,078	6,158		
	84,5467										
60	84,5319	84,5321	84,5322	84,5322	0,0145	31,550	7,247	2,001	11,428		
	84,5321										
90	84,5161	84,5163	84,5163	84,5164	0,0158	47,375	10,882	3,004	17,161		
	84,5163										
120	84,4994	84,4996	84,4994	84,4998	0,0167	64,100	14,723	4,065	23,219		
	84,4996										
150	84,4816	84,4817	84,4819	84,4817	0,0178	81,925	18,818	5,195	29,676		
	84,4817										
180	84,4663	84,4665	84,4667	84,4669	0,0151	97,050	22,292	6,154	35,154		
	84,4666										
210	84,4559	84,456	84,456	84,4561	0,0106	107,650	24,727	6,826	38,994		
	84,4560										

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE H – Cavitação de Amostras de HVOF + Laser

Tempo (min)	Peso das Amostras & Média (g)				Variação	Perda de Massa Acumulada (mg)	Profundidade Média de Erosão [MDE] (μm)	Perda em Volume (mm^3)	Perda por Área (mg/cm^2)	Temp. da água $^{\circ}\text{C}$	Profundidade de teste (mm)
	x1	x2	x3	x4							
0	44,7345	44,7346	44,7347	44,7347	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	18 \pm 2	12 \pm 4
	44,7346										
30	44,7245	44,7245	44,7245	44,7244	0,0102	10,150	2,331	0,644	3,677		
	44,7245										
60	44,7061	44,7061	44,7062	44,7064	0,0183	28,425	6,529	1,802	10,296		
	44,7062										
90	44,6972	44,6976	44,6975	44,6975	0,0088	37,175	8,539	2,357	13,466		
	44,6975										
120	44,671	44,6711	44,6711	44,6711	0,0264	63,550	14,597	4,030	23,020		
	44,6711										
150	44,6397	44,6401	44,64	44,6401	0,0311	94,650	21,741	6,002	34,285		
	44,6400										
180	44,5974	44,5976	44,5978	44,5978	0,0423	136,975	31,462	8,686	49,616		
	44,5977										
210	44,5804	44,5807	44,5806	44,5809	0,0170	153,975	35,367	9,764	55,774		
	44,5807										

Fonte: Autoria Própria.

9 ANEXOS

ANEXO A

12

II.4 YIELD STRESS, σ_y , AND TENSILE STRENGTH, σ_{ts}

		σ_y (MPa)	σ_{ts} (MPa)			
Metals	Ferrous	Cast Irons	215 - 790	350 - 1000		
		High Carbon Steels	400 - 1155	550 - 1640		
		Medium Carbon Steels	305 - 900	410 - 1200		
		Low Carbon Steels	250 - 395	345 - 580		
		Low Alloy Steels	400 - 1100	460 - 1200		
	Non-ferrous	Stainless Steels	170 - 1000	460 - 2240		
		Aluminium Alloys	30 - 500	58 - 550		
		Copper Alloys	30 - 500	100 - 550		
		Lead Alloys	8 - 14	12 - 20		
		Magnesium Alloys	70 - 400	185 - 475		
		Nickel Alloys	70 - 1100	345 - 1200		
		Titanium Alloys	250 - 1245	300 - 1625		
		Zinc Alloys	80 - 450	135 - 520		
		Ceramics	Glasses	Borosilicate Glass (*)	264 - 384	22 - 32
				Glass Ceramic (*)	750 - 2129	62 - 177
				Silica Glass (*)	1100 - 1600	45 - 155
				Soda-Lime Glass (*)	360 - 420	31 - 35
Porous	Brick (*)		30 - 140	7 - 14		
	Concrete, typical (*)		32 - 60	2 - 6		
	Stone (*)		34 - 248	5 - 17		
Technical	Alumina (*)		690 - 5500	350 - 665		
	Aluminium Nitride (*)		1970 - 2700	197 - 270		
	Boron Carbide (*)		2583 - 5687	350 - 560		
	Silicon (*)		3200 - 3460	160 - 180		
	Silicon Carbide (*)		1000 - 5250	370 - 680		
	Silicon Nitride (*)		524 - 3500	690 - 800		
Composites	Metal	Aluminium/Silicon Carbide	280 - 324	290 - 365		
		CFRP	550 - 1050	550 - 1050		
	Polymer	GFRP	110 - 192	136 - 241		
		Natural	Bamboo	35 - 44	36 - 45	
Cork	0.3 - 1.5		0.5 - 2.5			
Leather	5 - 10		20 - 26			
Wood, typical (Longitudinal)	30 - 70		60 - 100			
Wood, typical (Transverse)	2 - 6		4 - 9			

		σ_y (MPa)	σ_{ts} (MPa)		
Polymers ¹	Elastomer	Butyl Rubber	2 - 3	5 - 10	
		EVA	12 - 18	16 - 20	
		Isoprene (IR)	20 - 25	20 - 25	
		Natural Rubber (NR)	20 - 30	22 - 32	
		Neoprene (CR)	3.4 - 24	3.4 - 24	
		Polyurethane Elastomers (elPU)	25 - 51	25 - 51	
		Silicone Elastomers	2.4 - 5.5	2.4 - 5.5	
		ABS	18.5 - 51	27.6 - 55.2	
		Cellulose Polymers (CA)	25 - 45	25 - 50	
		Ionomer (I)	6.3 - 15.9	17.2 - 37.2	
	Thermoplastic	Nylons (PA)	50 - 94.8	90 - 165	
		Polycarbonate (PC)	59 - 70	60 - 72.4	
		PEEK	65 - 95	70 - 103	
		Polyethylene (PE)	17.9 - 29	20.7 - 44.8	
		PET	56.5 - 62.3	48.3 - 72.4	
		Acrylic (PMMA)	53.8 - 72.4	48.3 - 79.6	
		Acetal (POM)	48.6 - 72.4	60 - 89.6	
		Polypropylene (PP)	20.7 - 37.2	27.6 - 41.4	
		Polystyrene (PS)	28.7 - 56.2	35.9 - 56.5	
		Polyurethane Thermoplastics (tpPU)	40 - 53.8	31 - 62	
		PVC	35.4 - 52.1	40.7 - 65.1	
		Teflon (PTFE)	15 - 25	20 - 30	
		Thermoset	Epoxies	36 - 71.7	45 - 89.6
			Phenolics	27.6 - 49.7	34.5 - 62.1
			Polyester	33 - 40	41.4 - 89.6
		Polymer Foams	Flexible Polymer Foam (VLD)	0.01 - 0.12	0.24 - 0.85
			Flexible Polymer Foam (LD)	0.02 - 0.3	0.24 - 2.35
			Flexible Polymer Foam (MD)	0.05 - 0.7	0.43 - 2.95
	Rigid Polymer Foam (LD)		0.3 - 1.7	0.45 - 2.25	
	Rigid Polymer Foam (MD)		0.4 - 3.5	0.65 - 5.1	
	Rigid Polymer Foam (HD)		0.8 - 12	1.2 - 12.4	

(Data courtesy of Granta Design Ltd)

¹ For full names and acronyms of polymers – see Section V.
 (*) NB: For ceramics, yield stress is replaced by *compressive strength*, which is more relevant in ceramic design. Note that ceramics are of the order of 10 times stronger in compression than in tension.

ANEXO B

II.5 FRACTURE TOUGHNESS (PLANE STRAIN), K_{IC}

		K_{IC} (MPa√m)		
Metals	Ferrous	Cast Irons	22 - 54	
		High Carbon Steels	27 - 92	
		Medium Carbon Steels	12 - 92	
		Low Carbon Steels	41 - 82	
		Low Alloy Steels	14 - 200	
	Non-ferrous	Stainless Steels	62 - 280	
		Aluminium Alloys	22 - 35	
		Copper Alloys	30 - 90	
		Lead Alloys	5 - 15	
		Magnesium Alloys	12 - 18	
		Nickel Alloys	80 - 110	
		Titanium Alloys	14 - 120	
		Zinc Alloys	10 - 100	
		Ceramics	Glasses	Borosilicate Glass
Glass Ceramic	1.4 - 1.7			
Silica Glass	0.6 - 0.8			
Soda-Lime Glass	0.55 - 0.7			
Porous	Brick		1 - 2	
	Concrete, typical		0.35 - 0.45	
Technical	Stone		0.7 - 1.5	
	Alumina		3.3 - 4.8	
	Aluminium Nitride		2.5 - 3.4	
	Boron Carbide		2.5 - 3.5	
	Silicon		0.83 - 0.94	
	Silicon Carbide		2.5 - 5	
Composites	Metal Polymer		Aluminium/Silicon Carbide	15 - 24
			CFRP	6.1 - 88
		GFRP	7 - 23	
Natural	Bamboo	5 - 7		
	Cork	0.05 - 0.1		
	Leather	3 - 5		
	Wood, typical (Longitudinal)	5 - 9		
	Wood, typical (Transverse)	0.5 - 0.8		

(Data courtesy of Granta Design Ltd)

		K_{IC} (MPa√m)		
Polymers¹	Elastomer	Butyl Rubber	0.07 - 0.1	
		EVA	0.5 - 0.7	
		Isoprene (IR)	0.07 - 0.1	
		Natural Rubber (NR)	0.15 - 0.25	
		Neoprene (CR)	0.1 - 0.3	
		Polyurethane Elastomers (eIPU)	0.2 - 0.4	
		Silicone Elastomers	0.03 - 0.5	
		Thermoplastic	ABS	1.19 - 4.30
			Cellulose Polymers (CA)	1 - 2.5
			Ionomer (I)	1.14 - 3.43
	Nylons (PA)		2.22 - 5.62	
	Polycarbonate (PC)		2.1 - 4.60	
	PEEK		2.73 - 4.30	
	Polyethylene (PE)		1.44 - 1.72	
	PET		4.5 - 5.5	
	Acrylic (PMMA)		0.7 - 1.6	
	Acetal (POM)		1.71 - 4.2	
	Polypropylene (PP)		3 - 4.5	
	Polystyrene (PS)		0.7 - 1.1	
	Thermoset	Polyurethane Thermoplastics (tpPU)	1.84 - 4.97	
		PVC	1.46 - 5.12	
		Teflon (PTFE)	1.32 - 1.8	
		Epoxies	0.4 - 2.22	
		Phenolics	0.79 - 1.21	
		Polyester	1.09 - 1.70	
	Polymer Foams	Flexible Polymer Foam (VLD)	0.005 - 0.02	
		Flexible Polymer Foam (LD)	0.015 - 0.05	
		Flexible Polymer Foam (MD)	0.03 - 0.09	
		Rigid Polymer Foam (LD)	0.002 - 0.02	
		Rigid Polymer Foam (MD)	0.007 - 0.049	
		Rigid Polymer Foam (HD)	0.024 - 0.091	

¹ For full names and acronyms of polymers – see Section V.

Note: K_{IC} only valid for conditions of linear elastic fracture mechanics (see I. Formulae & Definitions). Plane Strain Toughness, G_{IC} , may be estimated from $K_{IC}^2 = E G_{IC} / (1 - \nu^2) \approx E G_{IC}$ (as $\nu^2 \approx 0.1$).

ANEXO C – Processo de Aspersão Térmica



Fonte: (INTERNATIONAL THERMAL SPRAY ASSOCIATION, 2017) (ITSA).

ANEXO D - Principais Constantes Térmicas dos Materiais de Interesse do Trabalho.

Composição	Ponto de Fusão (K)	Propriedades a 300K				Propriedades em diversas temperaturas (K), k(W/m * k) / Cp(J/kg * K)					
		ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg K)	k (W/m K)	$\alpha \cdot 10^5$ (m ² /s)	100	200	400	600	800	1.000
AISI 1010	"-"	7.832	434	63,9	18,8	"-"	"-"/ 487	58,7 / 559	48,8 / 685	39,2 / 1.168	31,3 / "-"
Cobalto	1769	8.862	421	99,2	26,6	167 / 236	122 / 379	85,4 / 450	67,4 / 503	58,2 / 550	52,1 / 628
Cromo	2118	7.160	449	93,7	29,1	159 / 192	111 / 384	90,9 / 484	80,7 / 542	71,3 / 581	65,4 / 616
Tungstênio	3660	19.300	132	174	68,3	208 / 87	186 / 122	159 / 137	137 / 142	125 / 146	118 / 148

Fonte: (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2016).

ANEXO E – Especificações Técnicas do Laser de CO_2

Especificações Série <i>Evolution</i> 125(S) Watt	
Potência de saída	125W
Modo de Qualidade	$M^2 < 1.2$
Elipticidade	< 1.2
Rise Time	$< 150 \mu\text{sec}$
Diâmetro de feixe	4.4mm
Divergência de feixe (ângulo Completo)	3.2mR
Comprimento de onda	10.59 μm
Estabilidade de Potência (cold start)	$\pm 5\%$
Polarização	Linear (Vertical)
Refrigeração	Água destilada
Potência de aquecimento (máx.)	3000W
Taxa de fluxo (18-22°C)	2 GPM
Tensão de entrada / corrente	30 VDC / 95A
Dimensões, Laser head (mm)	1240 x 168 x 122
Dimensões, RF supply (mm)	305 x 483 x 226
Peso, Laser head	36 lbs / 16.3 kg
Peso, RF supply	32 lbs / 14.6kg

Fonte: (SYNRAD, 2016).

ANEXO F – Seleção de Disco de Corte

BLADE SERIES	3 x 0.007in [76 x 0.15mm]	4 x 0.012in [102 x 0.3mm]	5 x 0.015in [127 x 0.4mm]	6 x 0.015in [150 x 0.5mm]	7 x 0.025in [180 x 0.6mm]	8 x 0.035in [203 x 0.9mm]
IsoMet Diamond Wafering Blades						
Series 30HC, polymers, rubber, soft gummy materials			X**		X**	X
Series 20HC, aggressive sectioning of metals			X*		X	X
Series 15HC, metal matrix composites, PCBs, bone, Ti, TSC	X	X	X	X	X	X
Series 20LC, hard tough materials, structural ceramics			X*		X	X
Series 15LC, hard brittle materials, glass, Al ₂ O ₃ , Zr ₂ O ₃ , concrete	X	X	X	X	X	X
Series 10LC, medium to soft ceramics, glass fiber reinforced composites	X		X		X*	X
Series 5LC, soft friable ceramics, composites with fine reinforcing, CaF ₂ , MgF ₂ , carbon composites	X		X			
IsoCut CBN Wafering Blades						
Low Concentration, Fe, Co, Ni based alloys and superalloys	X	X	X	X	X	X
High Concentration Fe, Co, Ni based alloys and superalloys		X	X	X	X	X
General Usage and AcuThin Abrasive Wheels For sectioning small, delicate specimens or where minimal deformation and kerf loss is the primary concern						
			Bound/Abrasive	5 x 0.19in [127 x 0.5mm]	7 x 0.03in [180 x 0.8mm]	
Tool Steel, hard Steel ≥ HRC45			R/Al ₂ O ₃	X		
Medium hard, soft steel ≤ HRC45			R/Al ₂ O ₃	X		
Soft materials			R/Al ₂ O ₃			X
Tough materials or general use			R/SiC			X

*Alternate blade thickness of 0.020in [0.5mm]

**Alternate blade thickness of 0.30in [0.8mm]

For a complete listing of Buehler consumable supplies for use with the IsoMet Precision Saws, please refer to the Buehler Product Catalogue.

Fonte: (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 9).

ANEXO G – Perfilômetro Veeco WYKO NT1100 (*Optical Profiling System*)**Especificações do Perfilômetro****SISTEMA**

Técnicas de Medição	Mudanças de fase óptica e interferometria por escaneamento vertical de luz branca
Capacidade de Medição	Tridimensional, sem contato, escaneamento do perfil superficial
Objetivas	1.5X, 2.5X, 5.0X, 10X, 20X, 50X; Revólver manual
Campo de visão das lentes	0.5X, 0.75X, 1.0X, 1.5X, 2.0X
Matriz de Medição	Selecionável pelo usuário, matriz máxima 736x480
Fonte de Iluminação	Lâmpada halógena de tungstênio (Seleção de Filtro Manual)
Estágios	manual; $\pm 50,8$ mm (± 2 pol.) X / Y, $\pm 4^\circ$ ponta / inclinação; Estágio de costura automatizada opcional, $\pm 50,8$ mm (2 pol.) X / Y
Montagem Óptica	Iluminador integrado; Lentes de aumento intercambiáveis; Mesa vertical para escaneamento de precisão
Video Display	Monitor monocromático de 127mm (5in)
Sistema Operacional	PC com processador Celeron®, Monitor de 430mm (17in.) SVGA; Impressoras e cartões de Network opcionais
Software	Wyko Vision32® software rodando com Microsoft® Windows XP®

PERFORMANCE

Alcance de Medição Vertical	0.1nm a 1mm
Resolução Vertical	$<1 \text{ \AA}$ Ra
Repetibilidade RMS	0.01nm
Velocidade de Escaneamento Vertical	Até 7.2 um/seg. (288uin./seg.)
Amostragem Espacial Lateral	0.08 a 13.1um
Campo de Visão	8.24mm a 0.05mm (Opções de Filtragem Para Áreas Maiores)
Refletividade	1% a 100%

AMBIENTE

Faixa de Temperatura	entre 15 e 30°C (59 a 86°F)
Faixa de Úmididade	$\leq 80\%$, não condensado
Vibração	Sistema de isolamento opcional (recomendado)

DIMENSÕES

Microscópio	399 mm W x 508 mm D x 737 mm H (15.5 in. W x 20 in. D x 29 in. H)
--------------------	---

PESO

Microscópio	não excede 56.7Kg (125lbs)
Peso de Envio	204.1kg (450lbs)

FONTE DE ENERGIA

Tensão de Entrada	Bivolt VAC, 50-60Hz
Consumo de Energia	$<300W$
Ar Comprimido	4.2-7.0kg/cm (60-100PSI). Para sistema opcional de isolamento

Fonte: Traduzido do Catálogo (VECCO, 2002).

ANEXO H – Fatores Que Influenciam na Precisão do Teste de Dureza de
Microindentação Vickers

Fatores Instrumentais	Fatores de Medição	Fatores do Material
Acuracidade da carga aplicada	Calibração do sistema de medição	Heterogeneidade da amostra
Efeito de inércia, velocidade de carregamento	Abertura da objetiva	Resistência da textura cristalográfica, se presente
Movimento lateral da endentadura ou amostra	Magnificação	Qualidade da preparação da amostra
Tempo de indentação	Qualidade de imagem inadequada	Baixa refletividade ou transparência
Distorções na endentadura	Uniformidade de iluminação	Deformação durante a endentadura
Dano ao penetrador	Distorção de imagem	Fratura durante a indentação
Espaçamento inadequado entre endentações ou bordas	Qualidade visual do operador	Óleo, graxa ou sujeira no penetrador ou amostra
Ângulo do penetrador	Focalização da imagem	

Fonte: (BUEHLER® SUMMET™, 2013, p. 107).

ANEXO I – Especificações Balança de Precisão Shimadzu AUX220

SHIMADZU AUX220	
Capacidade	220g
Precisão	0,1mg
Tempo Transiente	3s
Temperatura de Trabalho	5 a 40°C
Dimensões principais	(220mm W x 330mm D x 310mm H)
Peso do Equipamento	7 kg aprox.

Fonte: (SHIMADZU CORPORATION , 2017).