

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – CAMPUS ALEGRETE  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**PEDRO HENRIQUE EÇA RODRIGUES**

**Estudo Tribológico do Revestimento de Stellite 6, Aspergido por HVOF Antes  
e Após Polimento, e do Substrato de Aço Inoxidável AISI 304**

**ALEGRETE**

**2018**

**PEDRO HENRIQUE EÇA RODRIGUES**

**Estudo Tribológico do Revestimento de Stellite 6, Aspergido por HVOF Antes e Após Polimento, e do Substrato de Aço Inoxidável AISI 304**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ana Claudia Costa

**ALEGRETE**

**2018**

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

E372e Eça Rodrigues, Pedro Henrique

Estudo Tribológico do Revestimento de Stellite 6, Aspergido por HVOF  
Antes e Após Polimento, e do Substrato de Aço Inoxidável AISI 304 / Pedro  
Henrique Eça Rodrigues.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do  
Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2018.

"Orientação: Ana Claudia Costa de Oliveira".

1. Tribologia. 2. Desgaste. I. Título.

**Pedro Henrique Eça Rodrigues**

**Estudo Tribológico do Revestimento de Stellite 6, Aspergido por HVOF Antes e Após Polimento, e do Substrato de Aço Inoxidável AISI 304**

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

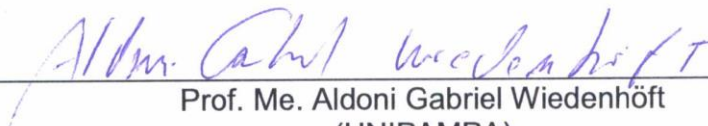
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de Junho de 2018

Banca examinadora:



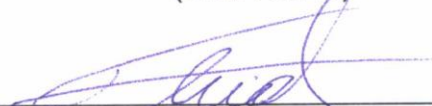
---

Prof. Dr.ª Ana Claudia Costa de Oliveira  
Orientadora  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Me. Thiago da Silveira  
(UNIPAMPA)

À memória de minha avó Adjacy, que durante todo seu tempo de vida com os netos sempre apoiou e incentivou os estudos, sendo mais que qualquer outra pessoa quem gostaria de estar presente nesse momento da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela minha saúde, perseverança e resiliência, atributos indispensáveis à minha formação.

Aos meus pais e irmão, Adriana, Paulo e João, por todo o suporte, incentivo e dedicação a minha formação durante todo esse tempo, sendo minhas bases e apoio constante e incessante desde sempre e principalmente nos momentos mais difíceis que a distância de casa pode proporcionar.

A todos os meus amigos, mas principalmente ao Manoel e a Isadora que assim como a minha namorada Natasha e minha família, foram meus apoios e refúgios em todos os momentos, felizes ou não.

A minha orientadora, professora Ana Claudia Costa de Oliveira por todo suporte e paciência e a empresa Rijeza pelo fornecimento do material utilizado no estudo aqui presente.

“A educação é aquilo que sobrevive depois que tudo o que aprendemos é esquecido”.

B. F. Skinner

## RESUMO

Com a evolução mecânica cresceu, também, a necessidade de melhoria contínua de componentes mecânicos. Desta forma, alguns problemas são enfrentados com certa frequência, tendo como exemplo este trabalho, o desgaste de componentes mecânicos causados pela interação entre diferentes materiais. Com a necessidade de se obter uma superfície que acresça a vida útil de peças e componentes de máquinas e que possua propriedades mecânicas que sejam resistentes ao desgaste abrasivo, revestiu-se uma superfície por aspersão térmica através do método de deposição HVOF (do inglês *High Velocity Oxygen Fuel*) com uma liga de cobalto, comercialmente conhecida como *Stellite 6*. Esse revestimento, com uma dureza maior que o substrato, caracteriza-se por sua alta resistência aos desgastes, aqui dando ênfase à abrasão. Este possui uma estrutura densa, com baixo nível de porosidade e um bom ancoramento ao substrato. As amostras revestidas foram analisadas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para verificar e qualificar a qualidade do revestimento, análise de microdureza, teste de desgaste e teste de rugosidade. Os ensaios e análises mostraram que as amostras revestidas de *Stellite 6* apresentaram melhor desempenho nos testes de microdureza, desgaste e rugosidade (desde que polidas) em relação as amostras do substrato de aço inoxidável AISI 304.

Palavras-Chave: Desgaste por abrasão, aspersão térmica, HVOF, revestimento, *Stellite 6*.



## ABSTRACT

With the increasing mechanical evolution, there has also been a need for continuous improvement of mechanical components. In this way, some problems are faced with a certain frequency, as an example we have the theme of this work, the wear of mechanical components caused by the interaction between different materials. With the need to obtain a surface that increases the useful life of parts and components of machines and which possesses mechanical properties that are resistant to the abrasive wear, a surface by thermal spraying was coated by the HVOF deposition method (High Velocity Oxygen Fuel) with a cobalt alloy, commercially known as Stellite 6. This coating, with a higher hardness than the substrate, is characterized by its high wear resistance, here emphasizing abrasion. It has a dense structure, with a low level of porosity and a good anchoring to the substrate. The coated samples were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) to verify and qualify coating quality, microhardness analysis, wear test and roughness test. The tests and analyzes showed that the Stellite 6 coated samples showed better performance in the microhardness, wear and roughness tests (if polished) compared to the AISI 304 stainless steel substrate samples.

Keywords: Abrasion wear, thermal spray, HVOF, coating, *Stellite 6*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos tipos de desgaste .....	4
Figura 2 - Recobrimento proveniente da aspensão térmica.....	8
Figura 3 - Representação esquemática da pistola de HVOF .....	9
Figura 4 - Comparativo de resistência ao desgaste .....	11
Figura 5 - Materiais fornecidos. a) Material com revestimento bruto e b) Material com revestimento polido .....	13
Figura 6 - Aplicação de revestimento pelo método HVOF com braço robótico .....	15
Figura 7- Máquinas Metalográficas. a) Cortadora de Precisão; b) Embutidora Digital Fortel 30 .....	16
Figura 8 - Imagem microscópio ótico .....	17
Figura 9 - MEV. a) Câmara de vácuo do MEV .....	18
Figura 10 - microdurômetro Buehler Tukon 1102.....	19
Figura 11- Dimensões da microindentação vickers.....	19
Figura 12- Ilustração do esquema de indentações.....	20
Figura 13 - Conjunto para ensaio de desgaste. a) Equipamento de Ensaio de Desgaste e b)Interface do equipamento .....	21
Figura 14 - Equipamento de desgaste .....	21
Figura 15 - Balança de precisão.....	22
Figura 16 - Rugosímetro TR200.....	23
Figura 17 - Revestimento de acabamento bruto em substrato. a) Superfície Bruta ..	24
Figura 18 - Revestimento de acabamento polido em substrato a) Superfície Polida	25
Figura 19 - Ampliação de 200X – acabamento brutoutoria .....	26
Figura 20 - Ampliação de 200X – acabamento polido.....	26
Figura 21 - Região de interface substrato-revestimento com ampliação de 500X ....	27
Figura 22 - Região de interface substrato-revestimento com ampliação de 800X ....	27
Figura 23 - Gráfico de Dureza x Profundidade do material .....	29
Figura 24 - Gráfico Comparativo de Perda de Massa .....	30
Figura 25 - Gráfico Comparativo de Perda de Volume.....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do processo HVOF .....	10
Tabela 2 – Propriedades Físicas do <i>Stellite 6</i> .....	14
Tabela 3 – Propriedades Químicas do <i>Stellite 6</i> .....	14
Tabela 4 – Propriedades do aço AISI 304.....	14
Tabela 5 – Parâmetros para ensaio de desgaste.....	22
Tabela 6 – Média das durezas de acordo com a profundidade.....	28
Tabela 7 – Média da Perda de Massa e Volume.....	30
Tabela 8 – Valores e parâmetros de rugosidade das superfícies.....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – *American Iron and Steel Institute*  
Al – Alumínio  
C – Carbono  
Cl – Cloro  
Cr – Cromo  
Cu – Cobre  
cm<sup>3</sup> - Centímetro cúbico  
Fe - Ferro  
g – Grama  
h – Hora  
HV – *Hardness Vickers*  
HVOF – *High Velocity Oxygen Fuel*  
kg – Quilograma  
kv – Quilovolt  
m - Metro  
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura  
ml – Mililitro  
mm – Milímetro  
Mn – Manganês  
Mo – Molibdênio  
Mpa – Megapascal  
m<sup>3</sup> - Metro cúbico  
mm<sup>3</sup> - Milímetro cúbico  
m/s – Metro por segundo  
N – Newton/Nitrogênio  
Ni – Níquel  
O – Oxigênio  
P – Fósforo  
pol – Polegada  
PSI – *Pound Force per Square Inch*

rpm – Rotações por minuto

S – Enxofre

Si – Silício

S<sub>ut</sub> – Tensão última ou tensão de ruptura em fadiga

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

W - Tungstênio

Å – Ångström

μm – micrometro

°C – Graus Celsius

## Sumário

<b>1 Introdução</b> .....	1
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral .....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	4
2.1 Tribologia .....	4
2.1.1 Desgaste .....	4
2.1.2 Desgaste Abrasivo .....	5
2.2 Aspersão Térmica.....	5
2.2.1 <i>High Velocity Oxygen Fuel</i> (HVOF).....	9
2.3 Revestimentos .....	10
2.3.1 <i>Stellite 6</i> .....	10
2.4 Aço Inoxidável .....	11
2.4.1 Aço Inoxidável AISI 304 .....	12
2.4.2 Aplicações do material .....	12
<b>3 Metodologia</b> .....	13
3.1 Materiais de Análise .....	13
3.2 Composição do Revestimento e Substrato.....	13
3.3 Aspersão por HVOF.....	15
3.4 Metalografia e Preparação dos Corpos de Prova .....	15
3.5 Microscopia Ótica .....	17
3.6 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	17
3.7 Micro Dureza .....	18
3.8 Ensaio de Desgaste Abrasivo por Lixa .....	20

3.9 Verificação de Rugosidade dos corpos de prova.....	23
<b>4 Resultados</b> .....	<b>24</b>
4.1 Análises Microestruturais e Metalográficas.....	24
4.2 Análise da Interface do Revestimento .....	25
4.3 Ensaio de Microdureza .....	28
4.4 Ensaio de Desgaste.....	29
4.5 Ensaio de Rugosidade.....	31
<b>5 Considerações Finais</b> .....	<b>34</b>
<b>6 Sugestões para Trabalhos Futuros</b> .....	<b>35</b>
<b>7 Referências</b> .....	<b>36</b>

## 1 Introdução

A criação ou desenvolvimento de novos materiais e processos é um dos principais desafios tecnológicos industriais, uma vez que ocorre uma demanda incessante por componentes que atendam às necessidades crescentes quanto à resistência ao desgaste e/ou a corrosão, com o menor custo possível.

Dentre as várias técnicas utilizadas no desenvolvimento de novos materiais, destaca-se a deposição de materiais, com características superiores às do metal base (substrato), nas superfícies dos componentes, melhorando, assim, seu desempenho quanto ao desgaste e/ou à corrosão, além de ser uma maneira eficiente para a recuperação de elementos danificados, acarretando diminuição de custos. Como exemplo de componentes que se beneficiariam de tal processo, é possível apresentar como exemplo as sedes de válvulas que estão em constante situação de atrito e conseqüentemente desgaste.

Os processos de aspersão térmica são uma das formas de se obter camadas de elevadas durezas para a proteção ou reparo do componente base, devido tanto a sua versatilidade quanto à aplicação, além dos tipos de camadas produzidas e suas espessuras. Nesses processos, é possível revestir substratos metálicos com polímeros, metal ou cerâmica. Entre esses processos, destacam-se: *HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)*, *Arcspray* (arco elétrico) e *Flame-spray* (aspersão por chama).

O estudo da resistência ao desgaste, então, se insere nesse contexto, visto que aumentar a mesma, em muitos casos, significa evitar ou diminuir custos diretos, troca de peças, ou indiretos como manutenções excessivas.

As falhas ou perdas por desgaste podem ser classificadas em diretas ou indiretas, semelhante ao demonstrado acima, isto de acordo com a maneira que ocorrem. Sendo diretas as que causam prejuízos diretamente como a troca de uma peça desgastada; indiretas as que causam perdas por vazamento e rupturas devido ao desgaste excessivo, por exemplo.

O desgaste está presente em situações em que há contato e movimento. Este pode ser considerado benéfico ou não de acordo com a ocasião. O desgaste é benéfico quando se trata de uma peça sendo usinada, entretanto é maléfico quando a ferramenta sofre desgaste na usinagem, por exemplo.



O trabalho proposto aborda a resistência ao desgaste abrasivo (remoção de material através do contato com um corpo mais duro) e como evitá-lo ou diminuir sua incidência, de maneira mais específica, em aço AISI 304 revestido de *Stellite 6*. O tema é tratado com base em informações já existentes na literatura, bem como testes laboratoriais.

Os ensaios realizados nesse trabalho se referem a um estudo do processo de desgaste acelerado, de maneira a obter um comparativo entre o material com revestimento de *Stellite* polido (comercial), bruto e o substrato. O aço é utilizado como substrato padrão para desenvolvimento de todos os testes e este contará com revestimento aplicado pelo método de aspersão HVOF.

Para execução dos testes de desgaste utiliza-se o equipamento *Phoenix Tribology*, modelo TE 53 SLIM, a fim de obter-se ao fim um perfil de desgaste para análise laboratorial e posterior comparativo entre o desgaste do material com revestimento bruto e polido, a fim de justificar, ou não, o polimento.

## **1.1 Justificativa**

Os sistemas mecânicos, geralmente contam com ações dinâmicas envolvendo forças e movimentos. Neste ambiente o maior responsável por perda de material é o desgaste.

Portanto, o estudo da tribologia, definida também por ciência e tecnologia que trata da interação entre superfícies em movimento relativo através, dentre muitos aspectos, do desgaste mostra-se de suma importância no âmbito de avanço tecnológico no que se diz a respeito ao estudo dos materiais.

Neste âmbito, tendo em vista que a comercialização do objeto de estudo deste trabalho se dá sob a condição de acabamento superficial polido a validação ocorre ao verificar se esta oferece maior resistência ao desgaste que o acabamento bruto ou o substrato por si só.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um estudo tribológico do aço AISI 304 revestido de *Stellite 6* visando caracterizar o aumento de sua resistência ao desgaste após a aplicação do revestimento.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios metalográficos para análise da interface entre o aço AISI 304 e o revestimento de *Stellite 6*;
- Realizar ensaios de desgaste, perfil de microdureza e rugosidade;
- Realizar um comparativo de resistência entre o substrato, revestimento de acabamento bruto e polido.

## 2 Revisão Bibliográfica

Esta seção é composta por apresentação de termos e informações necessárias para ampla compreensão do assunto por este abordado, sendo estes distribuídos em títulos e subtítulos.

### 2.1 Tribologia

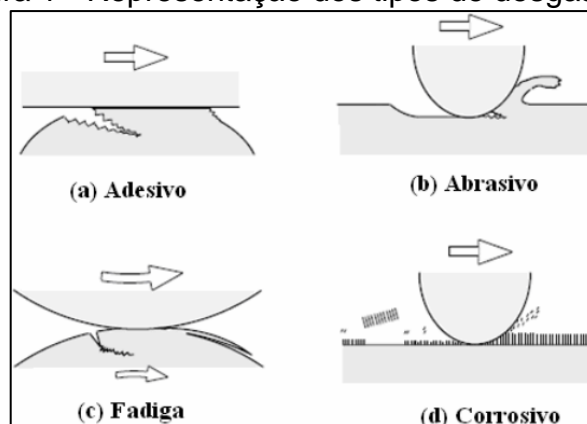
Tribologia, palavra de origem grega, significa estudo do atrito, como a ciência e tecnologia que estuda a interação entre superfícies que possuem movimento relativo e as práticas relacionadas a este fenômeno, utilizando-se de princípios como atrito, desgaste e lubrificação [1].

#### 2.1.1 Desgaste

É possível definir desgaste como sendo “o dano causado em uma superfície sólida, com perda progressiva de massa, devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro ou outros materiais” [2].

Dentre os focos de estudo desta ciência está o desgaste. Tradicionalmente são apresentados e aceitos quatro modos de desgaste. A Figura 1, a seguir apresenta-os visualmente.

Figura 1 - Representação dos tipos de desgaste [3]



Entre os tipos de desgaste normatizados encontra-se o desgaste abrasivo [4], escopo deste trabalho.

### 2.1.2 Desgaste Abrasivo

Este trabalho se atém ao desgaste do tipo abrasivo, mais especificamente o desgaste causado pela microabrasão. Para isso utiliza-se o ensaio de desgaste que segue o conceito *Block on Ring* (bloco sobre disco).

Desgaste abrasivo ou microabrasivo são termos frequentes em trabalhos nesse mesmo âmbito de pesquisa. Entretanto, não há separação entre estes termos, segundo a bibliografia. Isto ocorre porque a microabrasão se enquadra no mesmo conceito e desgaste abrasivo [4, 5 e 6].

A diferenciação entre desgaste abrasivo e microabrasivo pode ser realizada através do tamanho médio das partículas abrasivas. As partículas abrasivas com tamanho médio entre 3 e 6  $\mu\text{m}$  são utilizadas em ensaio microabrasivo com esfera rotativa [7, 8 e 9]. Por conseguinte, partículas entre 50 e 250  $\mu\text{m}$ , são usadas em ensaio abrasivo [1].

O ensaio de desgaste através da abrasão por disco rotativo (*Block on Ring*) foi desenvolvido com o intuito de medir a espessura de revestimentos e realizar comparativos de massa perdida com o mesmo. Porém, visto o potencial deste ensaio, este é aplicado em pesquisas envolvendo desgaste abrasivo de materiais metálicos e não metálicos em diferentes condições [10].

Na atualidade não há normas que regulamente este tipo de teste, entretanto há laboratórios europeus tentando normalizar o mesmo [11].

Como o ensaio de desgaste se baseia na variação de massa do material após o ensaio, define-se a Eq. 1, a seguir, a fim de quantificar tal variação.

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

Onde:

$p_m$  – Perda de massa;

$m_i$  – Massa do corpo de prova antes do ensaio de desgaste;

$m_f$  – Massa do corpo de prova após o ensaio de desgaste.

## 2.2 Aspersão Térmica

“Aspersão Térmica” é um termo que descreve um conjunto ou família de processos com o intuito de obter revestimentos que promovem melhorias, de

maneira prioritária, à corrosão, entretanto agrega resistência ao desgaste dos componentes [12,13, 14].

No passado, os processos de aspensão térmica não eram aceitos para aplicações com solicitações severas e extremas, principalmente devido à baixa qualidade e alta porosidade dos revestimentos obtidos por essa técnica. Como consequência da alta presença de poros, uma vez que estes são muitas vezes responsáveis por diminuir a resistência mecânica do material, os revestimentos apresentavam rápida delaminação e baixos coeficientes de coesão e adesão. Entretanto, a melhor qualidade das camadas aplicadas gerou grandes avanços, no que se refere à aplicação da aspensão térmica, além de grande aceitação dos revestimentos em aplicações de alta exigência de qualidade [15].

Nos últimos anos, a aspensão térmica vem aparecendo em diversos trabalhos e projetos como uma opção, ambientalmente limpa, de substituição do cromo duro [16], uma vez que este, a partir de 2017, não poderá mais ser aplicado em nenhum componente em indústrias da Europa. Revestimentos de cromo duro têm sido amplamente utilizados na indústria como proteção de componentes contra a corrosão e ao desgaste, porém seu processamento gera efluentes líquido e gasoso contendo cromo hexavalente (Cr+6). Tal componente é altamente tóxico e carcinogênico, além de necessitar de um tratamento físico-químico antes de seu descarte [17].

Para a obtenção de bons resultados é necessário, assim como em qualquer análise de processos, levar em consideração alguns parâmetros e considerações como o material do substrato, finalidade do mesmo e propriedades do material aspergido, por exemplo.

Em geral, os materiais utilizados na aspensão térmica são pós, varetas e fios, podendo estes ser metálicos, poliméricos, ou compósitos. É preciso considerar, para as varetas e fios, as propriedades químicas e térmicas, já para os pós de aspensão, além do que já foi dito anteriormente, também deve ser levado em consideração a granulometria e a geometria [18].

A etapa de maior influência na resistência e adesão do revestimento ao substrato é a preparação prévia da superfície, pois nela ocorre a eliminação de impurezas que possam diminuir a adesão. Além do fator de ancoramento mecânico

do revestimento no substrato, que é obtido de acordo com uma rugosidade superficial adequada (utilização do jateamento) [19].

A preparação da superfície é composta pelas etapas descritas a seguir:

- Pré-limpeza da superfície: etapa de remoção de impurezas, óxidos, graxas, restos de revestimentos, incrustações, borras e particulados grosseiros. Podendo estas ser realizadas através de processos mecânicos (hidrojateamento ou jateamento abrasivo), processos químicos (desengraxamento, decapagem) ou processos térmicos (queima, chama direta, atmosfera redutora) [20];

- Obtenção da rugosidade adequada no substrato: O processo de obtenção de rugosidade desejada é realizado, geralmente, com jateamento abrasivo, cujo principal objetivo é conferir ao substrato uma rugosidade e grau de limpeza adequado para a aplicação dos revestimentos por aspersão térmica [21];

- Pré-aquecimento: Quando as partículas aquecidas colidem com o substrato o seu resfriamento é rápido, o que pode acarretar na contração do material depositado. Neste processo, é possível que ocorra a dilatação do substrato, possivelmente originando tensões contrárias no substrato e no revestimento. O pré-aquecimento da superfície atua reduzindo o efeito descrito anteriormente. Além disso, ele também proporciona a volatilização de resíduos como óleos ou graxas presentes na superfície [19].

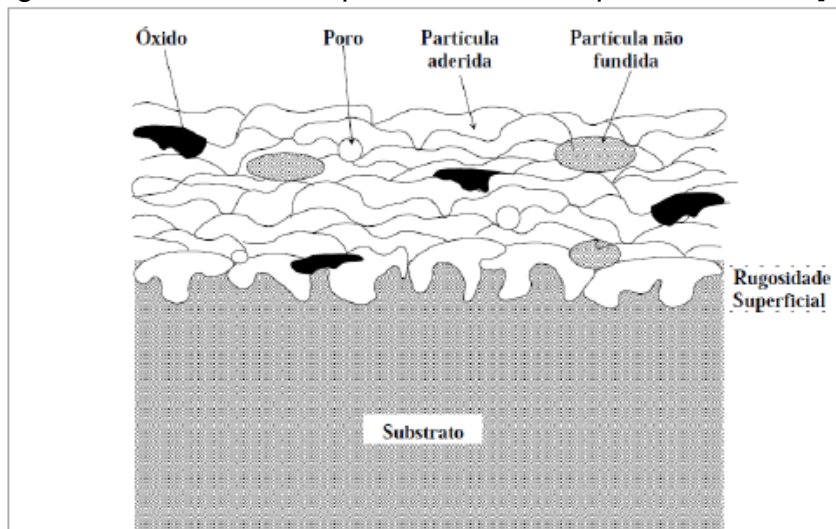
A escolha do processo de aspersão tem uma importância tão grande quanto à preparação superficial, sendo, muitas vezes, a parte mais importante do processo. A seleção do método segue alguns conceitos, sendo alguns deles:

- Material a ser aplicado;
- Requisitos de desempenho de revestimento;
- Custo;
- Tamanho e portabilidade do equipamento.

Se atendo à maneira com que ocorre o processo, verifica-se que o impacto de partículas aquecidas e aceleradas sobre o substrato faz com que estas adquiram o formato de pequenas lentes. O resfriamento é rápido, assim que atingem o substrato, dando origem a uma estrutura lamelar constituída de partículas achatadas em direção paralela à superfície do mesmo, contendo porosidades, vazios e

inclusões de óxidos [13, 14]. A seguir a Figura 2 apresenta de maneira mais clara e visual a estrutura característica de um revestimento obtido por aspersão térmica.

Figura 2– Recobrimento proveniente da aspersão térmica [15]



Dentre as opções de proteção de superfícies metálicas em ambientes agressivos, como o ambiente marinho, o processo de aspersão térmica vem sendo amplamente utilizado e estudado nos últimos anos [22, 23, 24, 25], por apresentar um número maior de vantagens se comparado a outros processos de obtenção de revestimentos.

Uma das principais vantagens do processo é sua versatilidade para pulverizar a maior parte dos revestimentos em pó (metálicos, compósitos, poliméricos ou cerâmicos) em uma ampla gama de substratos [14, 26]. Pode ser aplicado em componentes com diferentes geometrias e tamanhos e com possibilidade de aplicação tanto no processo de fabricação quanto depois de finalizada a peça [20]. Outro ponto positivo do processo, se comparado a outros, é o menor impacto ambiental associado ao baixo custo e alta taxa de produção [27].

É importante salientar outras duas grandes vantagens do processo que acabam por diferenciá-los dos outros métodos. A primeira é a obtenção de revestimentos sem aquecimento excessivo do material base (substrato), ou seja, sem alterar as propriedades da peça e sem distorção térmica excessiva do componente. A segunda é a possibilidade o reparo de peças danificadas ou gastas sem a necessidade de repor todo o componente [14].

Além da resistência à corrosão e ao desgaste, os revestimentos também são aplicados em peças proporcionando isolamento térmico [28], elétrico e compatibilidade biológica [29].

### 2.2.1 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)

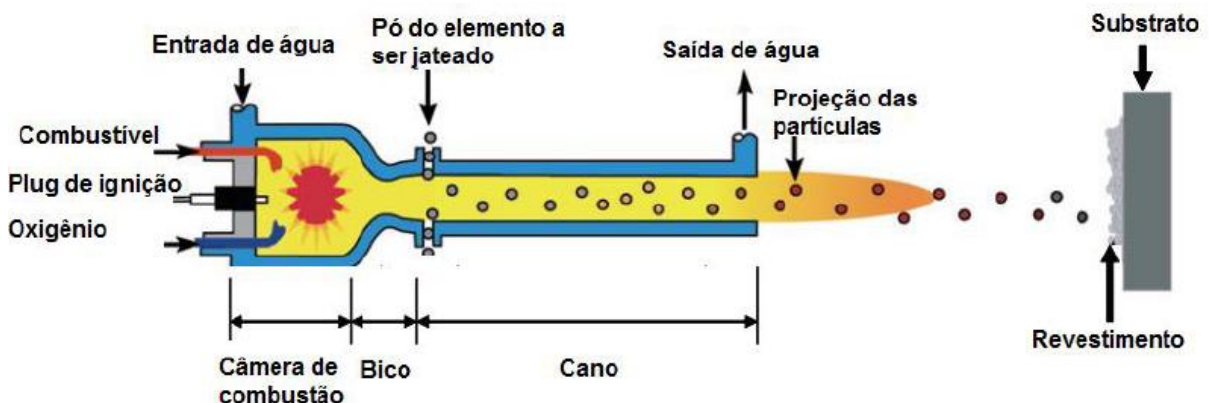
O método de aspersão HVOF, aspersão utilizando oxigênio como combustível, passou a ser discutido e utilizado no início da década de 1980 acarretando em estudos acerca deste método [30].

O processo consiste na mistura do gás combustível com o oxigênio dentro de uma câmara de combustão e, através de um sistema de ignição, a reação de combustão é iniciada. Como resultado da combustão criada tem-se um gás aquecido com pressão próxima a 1 Mpa [30].

O mesmo é despressurizado por uma área de seção transversal menor, promovendo um aumento na velocidade de vazão, alcançando velocidades elevadas (também conhecida por jato de transferência) passando pelo cano da pistola até ser expelido da mesma. Ao lado da câmara de combustão, o elemento que será aspergido, que deve ser em forma de pó, é inserido no jato de transferência e estes são projetados juntos pelo cano até o substrato que será recoberto [30].

A seguir, a Figura 3 apresenta de maneira esquemática o processo de aspersão HVOF:

Figura 3 – Representação esquemática da pistola de HVOF [30]



A velocidade da chama na saída da pistola é da ordem de  $1500 \text{ ms}^{-1}$ , sendo, portanto, consideradas chamas hipersônicas. As partículas de pó estão presentes



nesta chama e se chocam ao substrato de maneira bruta, gerando uma camada aderente e com pouca porosidade [30].

A Tabela 1, a seguir, apresenta as principais características para o processo de aspersão térmica HVOF, assim como as propriedades objetivadas na obtenção do revestimento.

Tabela 1 – Características do processo HVOF [31 - adaptado]

	Vazão de gases (m <sup>3</sup> /h)	T média (°C)	V impacto (m/s)	Aderência (1 a 10)	Teor de óxidos (%)
HVOF	28-57	3100	610 - 1060	8	0,2

Entretanto, é necessário destacar outros parâmetros técnicos deste processo, como a distância entre a pistola e o substrato, o tamanho das partículas, a taxa de alimentação do pó, o fluxo de combustível e o fluxo de oxigênio [29].

Recentes esforços no desenvolvimento de sistemas de pulverização HVOF visam essencialmente à otimização da combustão e melhora da aceleração de partículas [32].

## 2.3 Revestimentos

Com o intuito de melhorar as propriedades, sejam elas mecânicas, químicas ou físicas, do material (substrato) podem ser aplicados revestimentos, sejam eles cerâmicos, metálicos ou poliméricos.

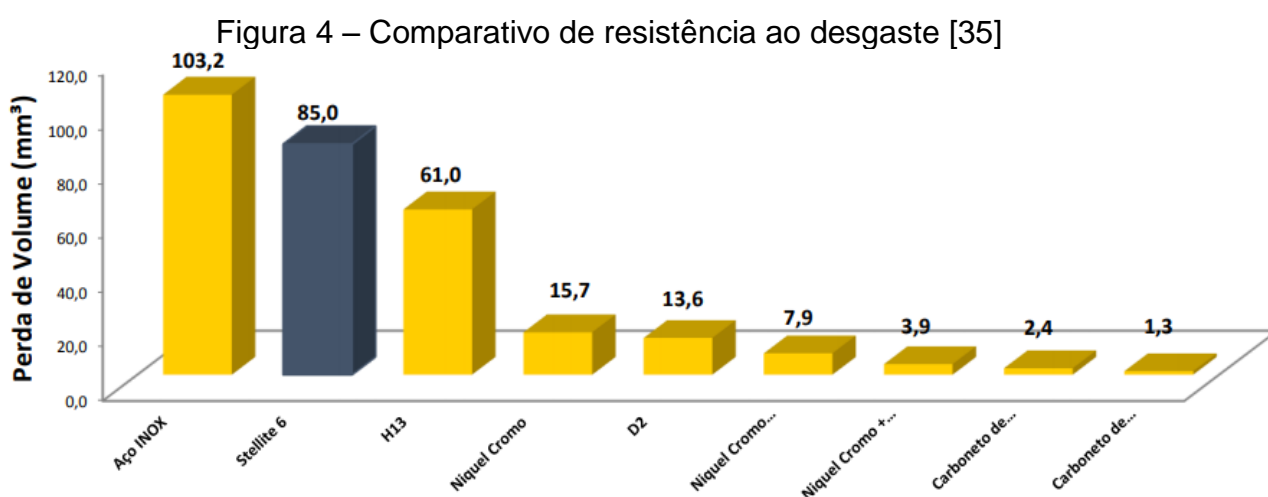
### 2.3.1 *Stellite* 6

Conhecido, comercialmente, por *Stellite* 6 a superliga a base de cobalto é amplamente empregada como revestimentos em situações que necessitem resistência ao desgaste e/ou corrosão a temperaturas entre 315 e 600°C. Seu nome é dado a um grupo composto por mais de 20 ligas à base de cobalto, originalmente desenvolvidas no início do século por Elwood Haynes, divididas em dois grandes grupos: 1) Co-Cr-W-C e 2) Co-Cr-W/Mo-Ni/Fe-C [33, 34]

As ligas de cobalto foram chamadas *Stellite*, do latim *Stella*, que significa estrela, em virtude de sua aparência brilhante, sem manchas [29].

A sua alta resistência ao desgaste se deve, em grande parte, ao complexo de carbonetos duros dispersos pela matriz de cobalto–cromo, que conferem a estas ligas características como resistência à cavitação, corrosão, erosão, abrasão e ao desgaste por fricção. Geralmente, as ligas com baixo teor de carbono são recomendadas para cavitação, desgaste por deslizamento ou desgaste por fricção metal—metal moderada. Já as ligas com maior teor de carbono são normalmente selecionadas para abrasão, desgaste por fricção severo ou erosão de baixo ângulo de ataque.

A seguir é apresentada a Figura 4, com gráfico comparativo de resistência ao desgaste abrasivo por esfera rotativa, fornecido pela empresa Rijeza, entre o *Stellite* 6 e outros materiais. Ainda que este trabalho não se atenha ao âmbito do ensaio por esfera rotativa, tal comparativo permite perceber a superioridade no que diz respeito a resistência ao desgaste.



## 2.4 Aço Inoxidável

O termo inoxidável foi criado, primeiramente para descrever os aços utilizados em talheres. Por conseguinte, é aplicado na atualidade como um termo genérico que abrange uma vasta gama de tipos e graduações de aço resistentes à oxidação ou corrosão [36].

É considerado aço inoxidável o aço que contenha pelo menos 10,5% de cromo, com composição química balanceada para ter uma melhor resistência à corrosão [37]. Entretanto, suas propriedades físicas e mecânicas como a resistência à deformação, robustez e tenacidade criogênica podem ser melhoradas

com a adição de alguns elementos de liga, tais como o níquel, principalmente, o molibdênio e o nitrogênio [36].

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco grandes grupos, sendo eles: os aços inoxidáveis austeníticos, os ferríticos, os duplex (austeníticos - ferríticos), as composições martensíticas e os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação [36].

#### 2.4.1 Aço Inoxidável AISI 304

O aço inoxidável AISI 304, conhecido também como aço inoxidável ao Cromo - Níquel, conta com uma baixa percentagem de carbono: <0,07% o que lhe confere uma resistência inter-cristalina à corrosão (destruição do grão, por corrosão) superior à dos normais aços inoxidáveis [37].

É um aço de estrutura austenítica, justificando seu anti-magnetismo. Sua dureza não pode ser aumentada por têmpera, entretanto sua resistência mecânica pode ser aumentada por deformação a frio [38]. Este aço não é recomendado uma vez que se necessitam trabalhos a temperaturas constantes superiores a 300°C. Entretanto, possui alta ductilidade, assim sendo de fácil estampagem. É resistente à corrosão da maior parte dos ácidos e sais e seu polimento aumenta tal resistência [37].

Os aços inoxidáveis austeníticos, como o objeto de estudo deste trabalho, são os mais utilizados dentre os aços inoxidáveis, assim como possuem o maior número de ligas [39].

#### 2.4.2 Aplicações do material

O material abordado neste trabalho tem sua aplicação voltada ao mercado que exija uma boa resistência ao desgaste e corrosão, principalmente onde há um grande valor agregado visto o alto custo do mesmo.

De acordo com dados fornecidos pela empresa responsável pelo revestimento de *Stellite 6*, o comércio é voltado para equipamentos como sede de válvulas, obturadores de válvula de esfera, válvulas de gaveta e luvas de bombas [35].

### 3 Metodologia

Esta seção tem por objetivo apresentar de maneira clara, e em sequência cronológica, as etapas e materiais necessários para a realização do estudo e processos aos quais o aço AISI 304 revestido de *Stellite* 6 foi submetido, neste trabalho, visando uma análise aprofundada de suas propriedades antes e após o revestimento metálico.

#### 3.1 Materiais de Análise

Para o presente estudo utilizou-se materiais fornecidos pela empresa Rijeza, os quais receberam os devidos tratamentos e processos com a intenção de prepará-los para os ensaios posteriores.

Na Figura 5, a seguir, é possível observar os materiais da maneira com que a empresa forneceu para a execução do trabalho.

Figura 5 – Materiais fornecidos. a) Material com revestimento bruto e b) Material com revestimento polido [Autoria Própria]



#### 3.2 Composição do Revestimento e Substrato

A empresa Rijeza fornece as propriedades mecânicas, apresentadas a seguir, na Tabela 2, do material *Stellite* 6, utilizado como material para a aspensão:

Tabela 2 – Propriedades Físicas do *Stellite 6* [35]

Propriedades Físicas	Valores
Microdureza	> 600 HV
Porosidade	< 1%
Temperatura máxima de Trabalho	600°C
Adesão	10.000 PSI
Camada Máxima	0,5 mm
Densidade	8,2 g/cm <sup>3</sup>

Assim como as propriedades físicas a composição química da liga de cobalto comercialmente chamada de *Stellite 6* é fornecida pela empresa. A Tabela 3, a seguir, fornece os dados das propriedades químicas do mesmo:

Tabela 3 – Propriedades Químicas do *Stellite 6* [35]

Revestimento	Composição Química máx. (% peso nominal)				
	Cobalto	Cr	W	C	Outros
<i>Stellite 6</i>	balanço	27-32	4-6	0,9-1,4	Ni, Fe, Si, Mn, Mo

O substrato, aço inoxidável AISI 304, tem suas propriedades, conforme a bibliografia, apresentada a seguir na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades do aço AISI 304 [37]

Propriedades Químicas (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
≤ 0,07	≤ 2,00	≤ 1,00	≤ 0,045	≤ 0,015	17 - 19,5	8 - 10,5	≤ 0,11
Propriedades Mecânicas							
S <sub>ut</sub>	Densidade (20 °C)	Modulo de Elasticidade (20 °C)			Dureza		
500-700 Mpa	7,9 g/cm <sup>3</sup>	200 kN/mm <sup>2</sup> ou Mpa			200 HV		

### 3.3 Aspersão por HVOF

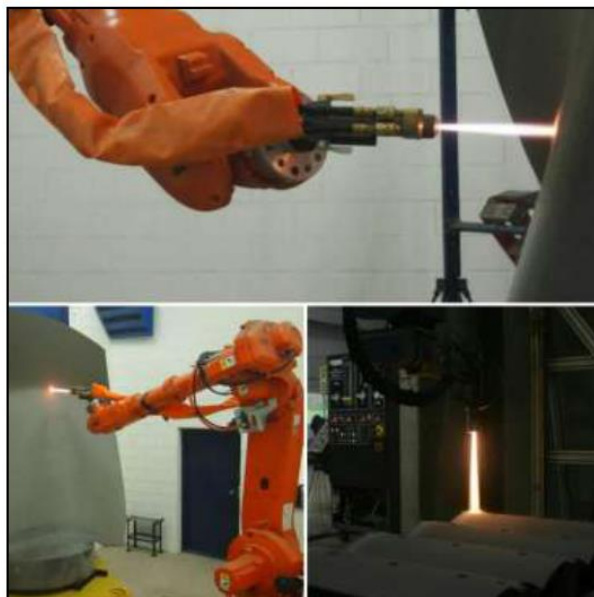
Antes da aspersão propriamente dita é necessário preparar o substrato, verificando sua rugosidade superficial a fim de aumentar a taxa de adesão do revestimento.

Em seguida, com o intuito de se evitar, ao máximo, contaminação é feita uma pré-limpeza. Esta pode ser realizada de diferentes maneiras, como visto na revisão bibliográfica do trabalho, entretanto a definição do método adotado é conteúdo da continuação deste.

O revestimento de *Stellite 6* é usualmente feito pelo método de soldagem, mas a empresa Rizeja utiliza o método de HVOF para tal finalidade. Desta forma se obtém um processo de aplicação mais veloz, um custo de aplicação inferior devido a menor utilização de material e tempo de processamento e ausência de risco de trincas associados com problemas de temperatura de aplicação.

A Figura 6, a seguir, ilustra uma aplicação HVOF da empresa anteriormente descrita.

Figura 6 – Aplicação de revestimento pelo método HVOF com braço robótico [40]



### 3.4 Metalografia e Preparação dos Corpos de Prova

Os processos metalográficos são necessários para a preparação dos corpos de prova com e sem o revestimento cerâmico.

Posteriormente é feita a análise e comparação através de microscopias e ensaios de micro dureza.

Os procedimentos seguem uma ordem onde o primeiro passo é realizar o corte metalográfico utilizando um disco de corte abrasivo visando definir o plano que será submetido à análise. Este plano deve ser tal que permita visualizar a interface de contato entre o substrato e o revestimento aplicado. Tal procedimento é realizado com o auxílio de uma máquina policorte, mostrada na Figura 7 mais adiante.

Devido a propensão ao deslocamento com manuseio inadequado, é necessário uma cortadora de precisão. Neste trabalho utilizou-se a máquina modelo IsoMet 4000 da marca Buehler, conforme mostrada na Figura 30, que foi projetada para cortar diversos tipos de materiais com deformação mínima.

As amostras cortadas na IsoMet 4000 são utilizados, não somente, para metalografia, mas também para a produção dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste.

Posterior ao corte realiza-se o embutimento do aço, nas amostras com a finalidade metalográfica, para facilitar seu manuseio nas próximas etapas do processo. Utiliza-se como resina o baquelite, conforme explicado anteriormente, e uma Embutidora Digital Fortel 30, vista na Figura 7.

Figura 7–Máquinas Metalográficas. a) Cortadora de Precisão; b) Embutidora Digital Fortel 30. [Autoria Própria]



Após o embutimento em baquelite lixam-se manualmente as amostras em uma sequência de lixas com granulometrias de 120, 220, 400, 600, 800, 1200, 1500

e 2000 com o auxílio de lixadeiras manuais, a fim de remover qualquer possível defeito pré-existente.

Na sequência, após a secagem das amostras, estas são submetidas ao polimento onde se utiliza um pano de polimento com alumina ( $Al_2O_3$ ) de  $1\mu m$ , para dar acabamento superficial. O agente químico responsável pelo ataque químico à superfície de estudo é o Kalling, reagente utilizado para aços austeníticos. É composto por 3g de  $CuCl_2$ , 5ml de HCl e 50ml de etanol.

### 3.5 Microscopia Ótica

Com o auxílio de um microscópio ótico é observada a superfície desejada, entretanto, este tem um aumento reduzido impedindo uma visualização tão aprofundada quanto o MEV, que será abordado mais adiante no trabalho.

A utilização do microscópio ótico se restringe a uma análise prévia da amostra, afim de verificar a integridade do revestimento após o corte e embutimento.

A Figura 8, a seguir, traz um microscópio ótico da marca Fortel, utilizado na análise microscópica das amostras deste trabalho:

Figura 8– Imagem microscópio ótico [Autoria Própria]



### 3.6 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

O funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), uma vez que haja aplicação de



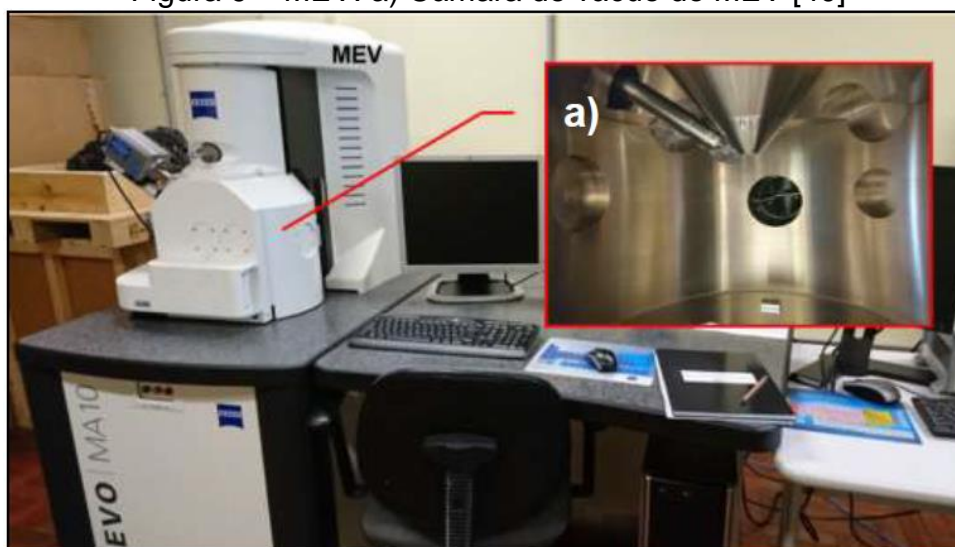
uma diferença de potencial entre 0,5 kV e 30 kV. Essa variação de tensão permite a variação da aceleração dos elétrons rumo ao eletrodo positivo [41].

Tal equipamento auxilia na quantificação e caracterização (morfologia e tipo) de um material seja após um ensaio ou pelo uso em serviço. Os elétrons secundários produzidos quando um metal é bombardeado com um feixe de elétrons são usados nesta técnica. O MEV combina alta resolução (100 - 200 Å) com profundidade de foco, 1000 vezes maior que as possíveis em um microscópio ótico. Além do fator que a preparação das amostras é simples, comparada com a requerida por outras técnicas.

Por conseguinte, a técnica de análise com o auxílio do MEV será de suma importância para uma melhor visualização do substrato e dos revestimentos após sua aplicação.

O aparelho acima descrito é parte do patrimônio laboratorial da Fundação Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete e é apresentado na Figura 9, a seguir, onde é possível, inclusive, visualizar o interior da câmara de vácuo (local onde ocorrem as análises do equipamento).

Figura 9 – MEV. a) Câmara de vácuo do MEV [40]



### 3.7 Micro Dureza

Ensaio de micro dureza ou dureza por microindentação são mais recomendados para medir pequenas dimensões e fases metalográficas específicas. O procedimento segue as normas da ASTM E384 e ISO 6507, que regem as

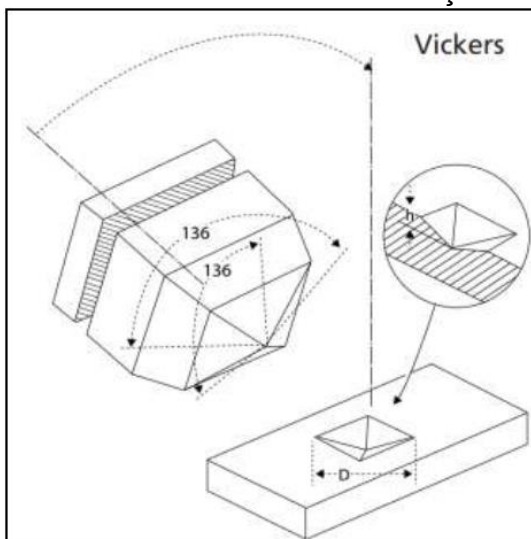
medições Vickers e Knoop. O microdurômetro que será utilizado no processo é o modelo Buehler Tukon 1102, do laboratório de ensaios mecânicos da Unipampa, como mostra a Figura 10:

Figura 10 - microdurômetro Buehler Tukon 1102 [42]



Após o teste de microindentação, é criada, no material, uma marca em formato piramidal de base quadrada, com profundidade de aproximadamente um sétimo do comprimento da diagonal [42]. Tal geometria pode ser observada na Figura 11:

Figura 11– Dimensões da microindentação vickers [40]



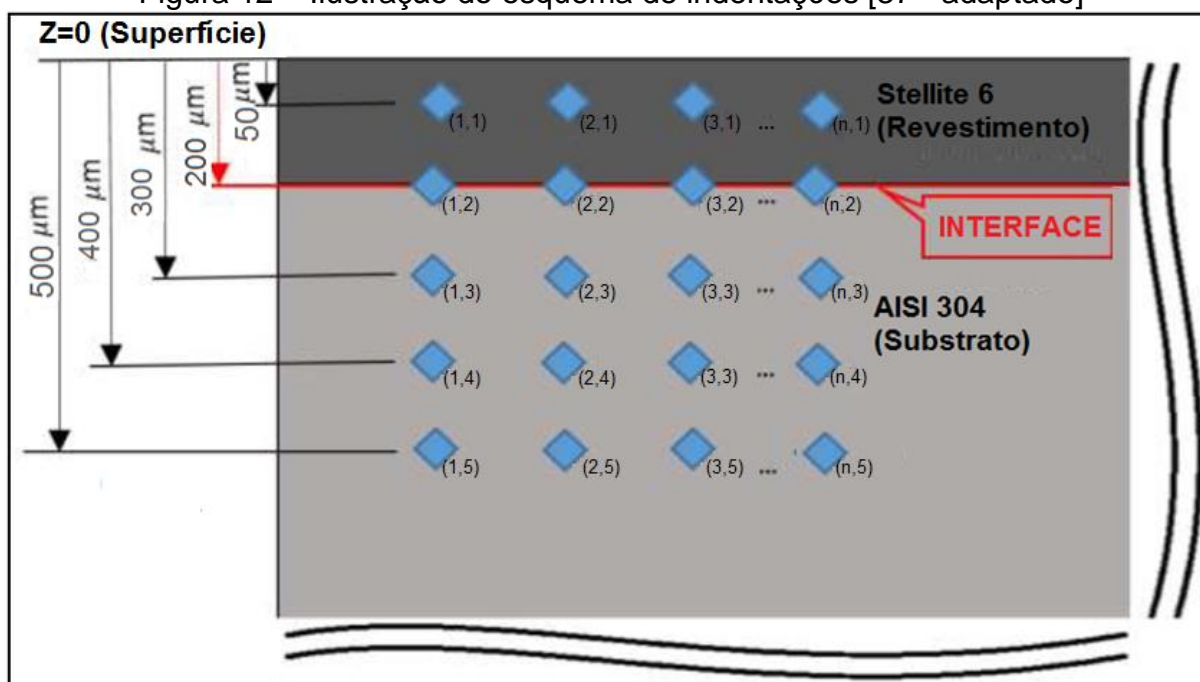
O procedimento se baseia na aplicação da carga lentamente sobre a amostra, evitando impacto, mantendo o indentedor sobre a superfície por um determinado tempo, que varia de acordo com o material, antes de iniciar o descarregamento. A qualidade física das endentaduras e acuracidade da carga aplicada devem ser controladas para garantir os resultados corretos [40].

Um dos aspectos que definem a qualidade nas medições é o fato de se deixar uma distância mínima entre endentações de três vezes a diagonal da marca deixada pelo diamante (endentador). Isto previne que haja falsos desvios do valor da dureza, devido ao encruamento do material nas regiões adjacentes à deformação plástica deixada pelo penetrador [40].

Para assegurar a veracidade dos resultados obtidos, se faz necessário realizar a microindentação algumas vezes, seguindo a recomendação do parágrafo anterior ao longo da superfície em estudo.

A Figura 12, adiante, apresenta de maneira ilustrativa a forma aproximada de como foram feitas as indentações no corpo de prova no intuito de se obter uma maior confiabilidade dos resultados obtidos. Portanto, efetuou-se um mínimo de 60 indentações para assegurar a veracidade dos valores obtidos.

Figura 12 – Ilustração do esquema de indentações [37 - adaptado]



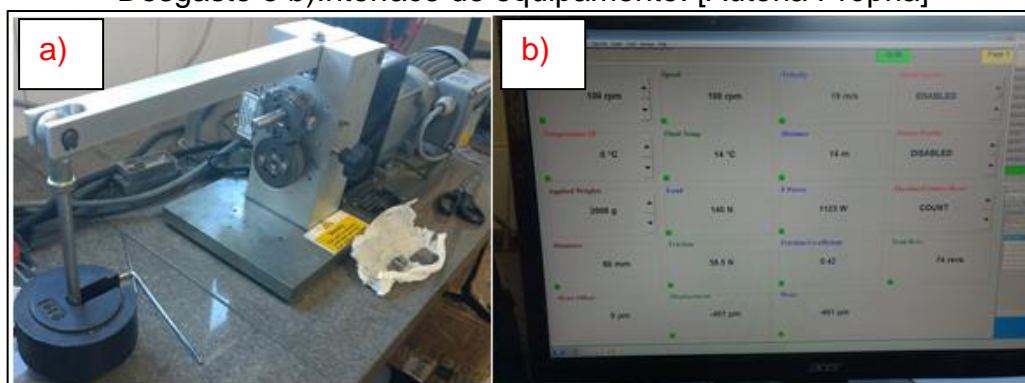
### 3.8 Ensaio de Desgaste Abrasivo por Lixa

A fim de se obter um comparativo de resistência ao desgaste entre o substrato e os revestimentos bruto e polido (comercial), efetuou-se medições de massa e cálculo de volume para o aço AISI 304 com revestimento de *Stellite 6* bruto,

posteriormente para o aço AISI 304 com revestimento de *Stellite 6* polido e por último para o aço AISI 304.

A realização do ensaio de desgaste, do tipo *Block on Ring*, contou com o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Engenharia Mecânica da Unipampa. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.

Figura 13 – Conjunto para ensaio de desgaste. a) Equipamento de Ensaio de Desgaste e b) Interface do equipamento. [Autoria Própria]



A Figura 14, a seguir, apresenta de maneira mais clara e ilustrativa o equipamento utilizado neste ensaio.

Figura 14 – Equipamento de desgaste [43]



Onde:

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

Baseado na literatura, outros trabalhos realizados e testes tornou-se possível obter os parâmetros para o ensaio de desgaste. Estes são apresentados a seguir na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para ensaio de desgaste [Autoria Própria]

Parâmetros do Ensaio	
Diâmetro do disco de desgaste (mm)	60
Carga aplicada (Kg)	3
Número de ciclos	300
Granulometria da lixa (grãos/pol <sup>2</sup> )	120
Número de revoluções (rpm)	50
Força (N)	287

Visto que a perda de massa é o que caracteriza este ensaio é necessário uma balança com alta resolução. Portanto, afim de se obter a massa exata de cada corpo de prova, utilizou-se uma balança da marca Shimadzu modelo AY220, com resolução de 0,001g, localizada no laboratório de química e metalografia da Unipampa. A utilização dela é feita com a amostra dentro da balança, evitando-se ao máximo a interferência do meio externo nos resultados.

A Figura 15, a seguir, apresenta a balança anteriormente descrita.

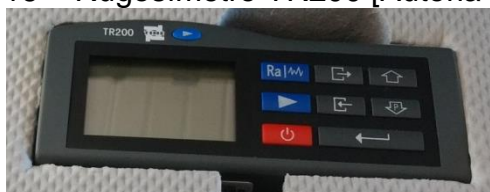
Figura 15 – Balança de precisão [Autoria Própria]



### 3.9 Verificação de Rugosidade dos corpos de prova

A metrologia da superfície dos corpos de prova foi realizada com um rugosímetro TR200, marca HOMIS, do Laboratório de Metrologia da Unipampa, utilizando um apalpador mecânico com precisão de aproximadamente 10% (Vide Figura 16). Estes equipamentos são utilizados para indústrias que requerem alta precisão ou em laboratórios de referência, de fácil operação com tecnologia de medição de rugosidade.

Figura 16 – Rugosímetro TR200 [Autoria Própria]





## 4 Resultados

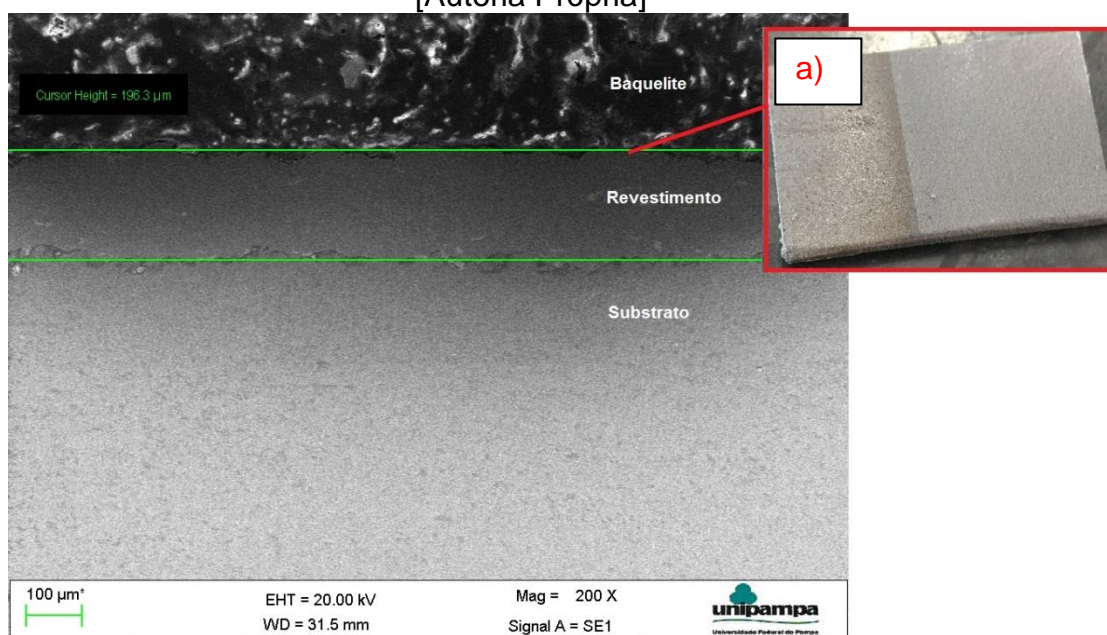
Nesta seção os resultados dos processos e métodos apresentados no capítulo anterior são expostos juntamente com uma análise aprofundada no intuito de atingir os objetivos propostos neste trabalho.

### 4.1 Análises Microestruturais e Metalográficas

Para análise microestrutural da face composta pelo revestimento de *Stellite 6* e substrato do aço austenítico AISI 304 com o auxílio das imagens geradas no MEV, executou-se corpos de prova como descrito na metodologia.

Analisando a imagens da Figura 17, a seguir, feitas com o auxílio do MEV é possível verificar a espessura da camada de revestimento com acabamento bruto.

Figura 17 – Revestimento de acabamento bruto em substrato. a) Superfície Bruta [Autoria Própria]

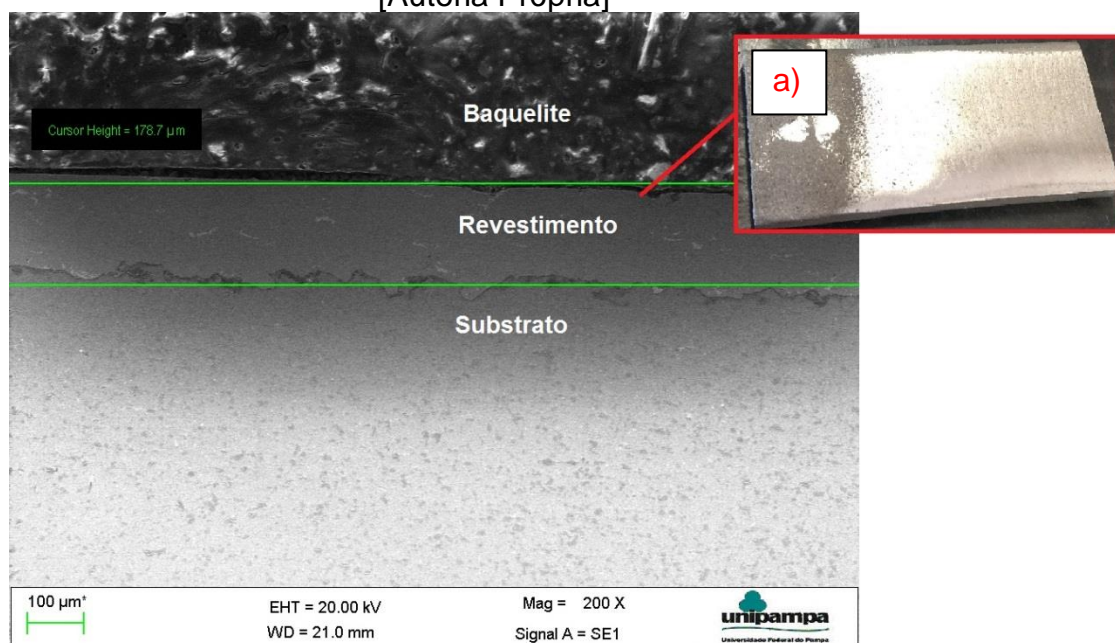


Através da imagem com aumento de 200 vezes e da funcionalidade de medições do MEV avalia-se uma espessura de aproximadamente 196,3 µm do revestimento com acabamento bruto. Este apresenta boa aderência ao substrato e nenhuma, ou mínimas oxidações. Assim representando um bom tratamento da

superfície revestida pelo *Stellite 6*, bem como bons parâmetros (não fornecidos pela empresa) de aspersão.

Em sequência a análise é preciso fazer as mesmas verificações ao revestimento com acabamento superficial polido (comercial), como apresentado na Figura 18. Entretanto, já se pode prever uma camada com espessura menor.

Figura 18 - Revestimento de acabamento polido em substrato. a) Superfície Polida [Autoria Própria]



A previsão de menor espessura de revestimento se confirma, uma vez que o de acabamento polido tem aproximadamente 178,7 μm, apresentando em torno de 20 μm a menos que o de acabamento bruto. A espessura menor se deve a perda de material na superfície por conta do processo de polimento.

#### 4.2 Análise da Interface do Revestimento

Nesta seção, são apresentadas análises do revestimento com diferentes ampliações a fim de avaliar a interface entre o revestimento e o substrato. Nas imagens apresentadas a seguir o revestimento e substrato têm seus nomes escritos nas regiões que os compreende. A Figura 19 e 20, conforme descrito anteriormente, mostram as imagens captadas pelo MEV na região de interface.



Figura 19 – Ampliação de 200X – acabamento bruto [Autoria Própria]

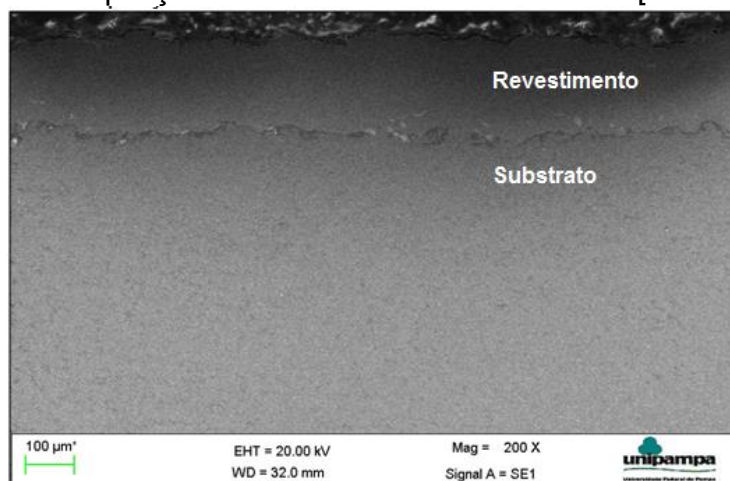
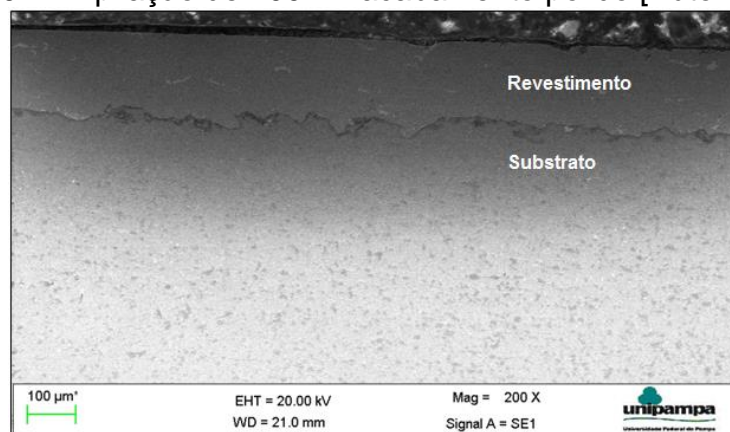


Figura 20 - Ampliação de 200X – acabamento polido [Autoria Própria]



Através da análise das figuras apresentadas, pode-se observar que o revestimento aspergido via HVOF se mantém bastante homogêneo, sem trincas e com baixa porosidade e oxidação em ambos os casos.

Uma vez que o polimento só altera as propriedades da superfície desprende-se que a interface nas imagens são semelhantes, como esperado. É possível observar, também, o bom ancoramento entre o revestimento e o metal base, resultando assim, em alta resistência ao deslocamento e uma melhora das propriedades mecânicas, visto a ausência ou baixa presença de poros.

Para uma melhor análise da interface entre o substrato e o revestimento foram são apresentadas as Figuras 21 e 22, capturadas com o auxílio do MEV.

Através da Figura 21 é possível constatar a presença de panquecas [29], que são ocasionadas por materiais que não tiveram sua fusão completa no processo de aspersão e, por conseguinte acabam aprisionados nesta região. Assim como poros

e oxidações, tais panquecas podem fragilizar o revestimento e sendo causas de futuros deslocamento.

Figura 21 – Região de interface substrato-revestimento com ampliação de 500X  
[Autoria Própria]

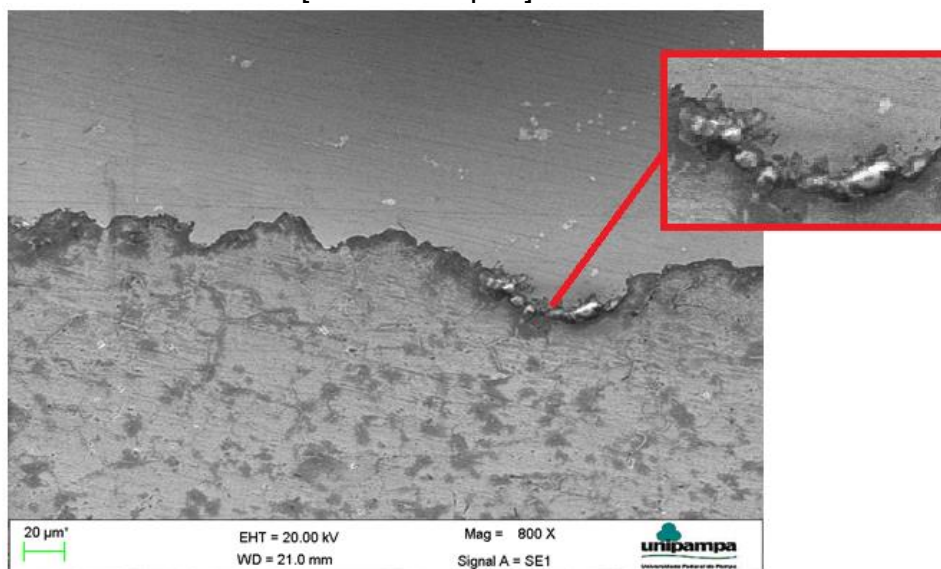
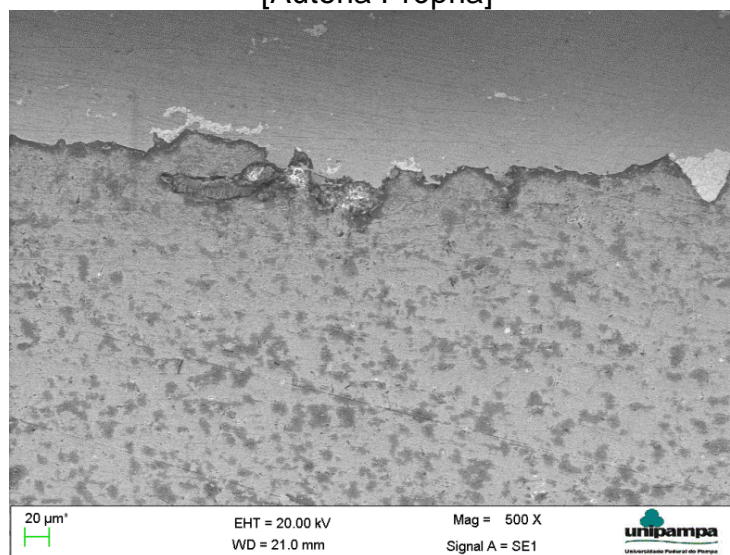


Figura 22 – Região de interface substrato-revestimento com ampliação de 800X  
[Autoria Própria]



Utilizando estas ampliações é possível uma análise aprofundada da região de interface com o intuito de verificar a presença de inclusões, materiais que não foram fundidos no processo e que, portanto, podem fragilizar a ancoragem do revestimento, poros e oxidações.

A Figura 22 reforça o já analisado nas imagens geradas com menor ampliação. Assim como em todas as ampliações já apresentadas, esta fortalece a ideia da inexistência ou baixa presença de oxidações, poros, vazios ou trincas, constituindo, assim, um revestimento, denso e uniforme.

### 4.3 Ensaio de Microdureza

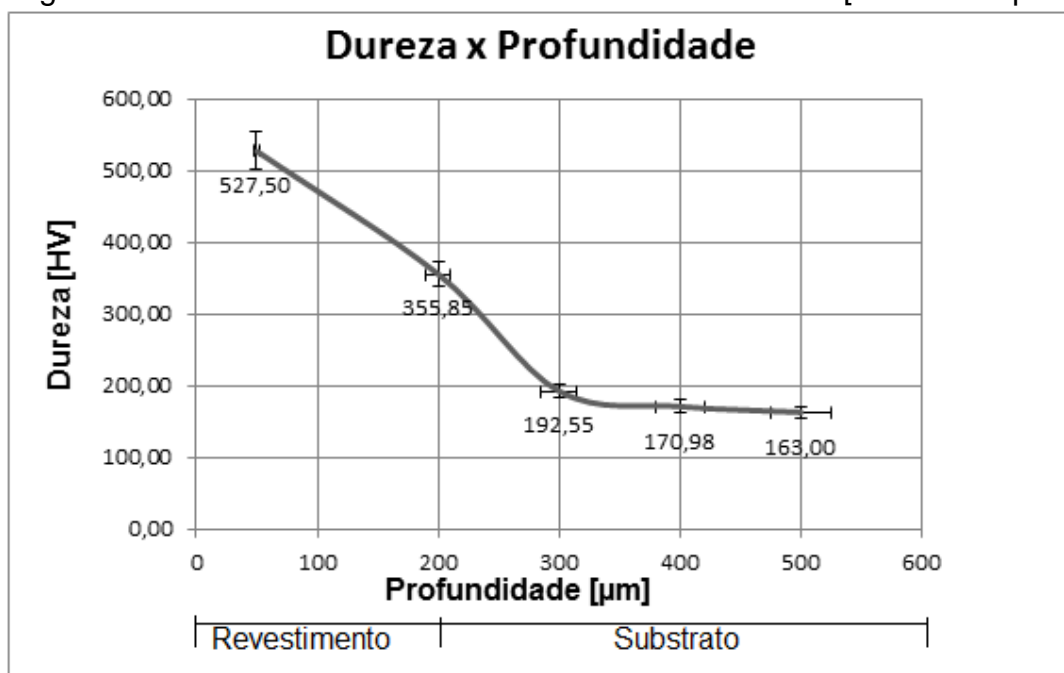
O ensaio de microdureza foi realizado assim como mostrado na metodologia, com uma carga de 0,5 kg durante um período de 10 segundos, exibindo resultados na escala Vickers (HV). Para uma melhor análise dos resultados, foram realizadas séries de endentações, variando-as ao longo da amostra, começando pelo revestimento e se distanciando na direção do núcleo do substrato. Os valores médios de microdureza obtidos são abaixo apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Média das durezas de acordo com a profundidade [Autoria Própria]

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Dureza (HV)
50	527,50
200	355,85
300	192,55
400	170,98
500	163,00

Obtendo-se o valor médio das durezas com a variação de profundidade gerou-se o Figura 23, a seguir a apresentado, ilustrando uma diminuição da dureza conforme há o deslocamento no sentido do centro do substrato.

Figura 23 – Gráfico de Dureza x Profundidade do material [Autoria Própria]



Os resultados, em conformidade com a bibliografia, apresentaram um revestimento consideravelmente mais duro que o substrato, demonstrando uma melhoria na dureza do material.

Verifica-se, também, uma diminuição de aproximadamente 170 HV entre o centro do revestimento (527,50 HV) e a interface com o substrato (355,85 HV).

#### 4.4 Ensaio de Desgaste

A realização do ensaio de desgaste comparou três corpos de prova, uma amostra de aço inoxidável AISI 304, uma de aço inoxidável AISI 304 com revestimento de *Stellite* 6 de acabamento superficial bruto e outra também de aço inoxidável AISI 304 com revestimento de *Stellite* 6, porém, com acabamento superficial polido. A seguir é apresentada a Tabela 7, onde são expostos os valores médios de perda de massa e de volume.

Tabela 7 – Média da Perda de Massa e Volume [Autoria Própria]

Amostra	Média	
	Perda de massa	Perda de volume
AISI 304	0,069 g	0,0087 cm <sup>3</sup>
Revestimento Bruto	0,085 g	0,01034 cm <sup>3</sup>
Revestimento Polido	0,042 g	0,0033 cm <sup>3</sup>

Com os valores médios obtidos, com a finalidade de facilitar a interpretação e visualização dos resultados geraram-se gráficos de colunas, a seguir apresentados nas Figuras 24 e 25, com os dados da perda de massa e de volume, respectivamente.

Figura 24 – Gráfico Comparativo de Perda de Massa. [Autoria Própria]

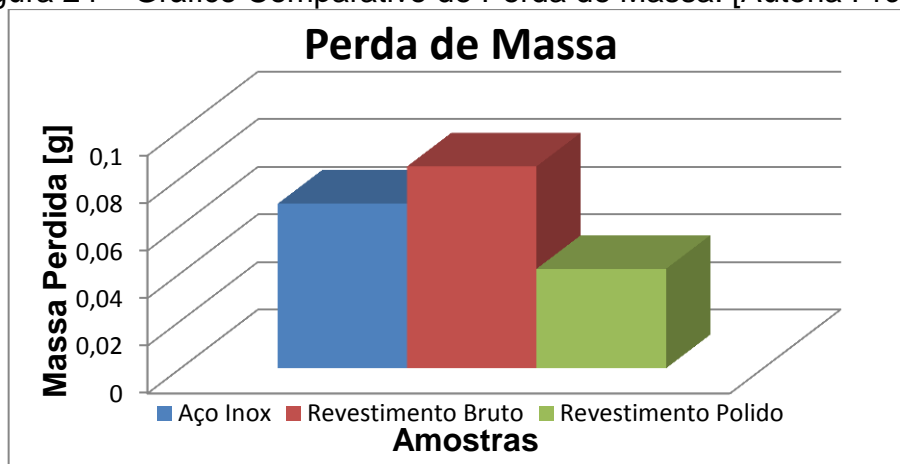
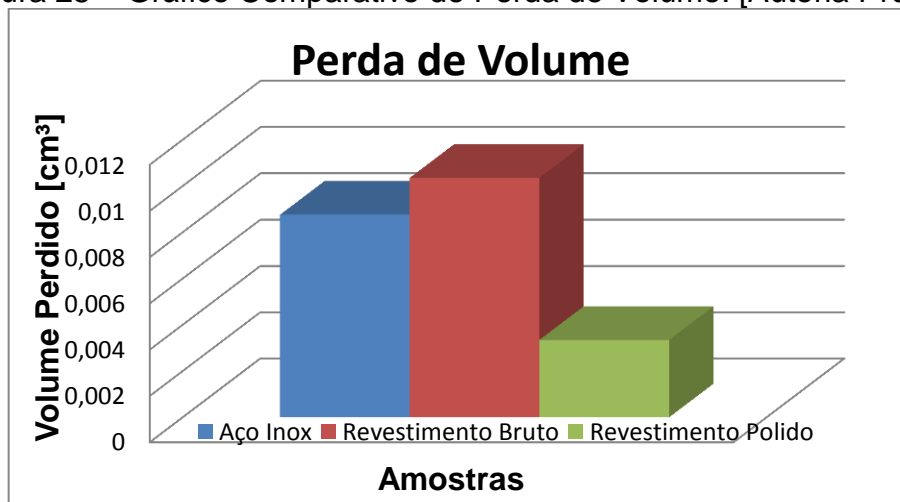


Figura 25 – Gráfico Comparativo de Perda de Volume. [Autoria Própria]



Com base na análise dos gráficos resultantes dos dados obtidos no ensaio de desgaste, observou-se que a maior resistência é do revestimento com acabamento polido, perdendo 0,042 g de massa e 0,0033 cm<sup>3</sup> em volume. Entretanto, contra as expectativas criadas após o estudo da bibliografia, onde espera-se maior perda de massa e volume do substrato, a menor resistência é do revestimento com acabamento bruto, perdendo 0,085 g em massa e 0,01034 cm<sup>3</sup> de volume durante o teste. De acordo com esses dados, pode-se concluir que:

- O substrato de aço inoxidável AISI 304 revestido com *Stellite* 6 de acabamento polido tem um acréscimo de aproximadamente 60,43% na resistência ao desgaste;
- O substrato de aço inoxidável AISI 304 revestido com *Stellite* 6 de acabamento Bruto tem um decréscimo de aproximadamente 22,7% na resistência ao desgaste.

Diz-se que o resultado é contrário a bibliografia, pois através da mesma espera-se que o aço inoxidável tenha uma resistência consideravelmente menor que os revestimentos. Desta maneira, tal análise leva ao questionamento da variação do resultado.

Visto o problema acima descrito, pressupondo que a causa de tal mudança esteja associada à rugosidade, no próximo tópico deste trabalho se apresenta o ensaio de rugosidade.

#### **4.5 Ensaio de Rugosidade**

Com o objetivo de solucionar o problema apresentado no tópico anterior, submeteu-se os corpos de prova a uma análise da sua rugosidade superficial.

Os dados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 8, a seguir, juntamente com a descrição de cada um dos parâmetros do mesmo (a fim de facilitar a leitura e compreensão dos dados).

Tabela 8 – Valores e parâmetros de rugosidade das superfícies. [Autoria Própria].

Nome	Medição			Unidade	Descrição
	Aço Inox	Revestimen-to Polido	Revestimen-to Bruto		
$R_a$	3,118	0,964	6,407	$\mu\text{m}$	Perfil médio de Rugosidade
$R_q$	2,36	4	7,863	$\mu\text{m}$	Perfil de Rugosidade RMS ( <i>Root-Mean-Square</i> )
$R_t$	14,46	31,31	40,56	$\mu\text{m}$	Pico Máximo do Perfil de Rugosidade
$R_z$	10,32	16,69	33,6	$\mu\text{m}$	Linha Média Entre Pico e Vale do Perfil de Rugosidade
$R_p$	4,159	9	16,37	$\mu\text{m}$	Pico Máximo de Altura do Perfil de Rugosidade
$R_v$	6,164	7	17,23	$\mu\text{m}$	Pico Máximo de Profundidade do Perfil de Rugosidade
$R_{sm}$	0,286	0,2352	0,1538	$\mu\text{m}$	Espaçamento Médio das Irregularidades do Perfil de Rugosidade
$R_{sk}$	-0,458	0,53	-0,003		Fator de Assimetria ( <i>Skewness</i> )
$R_t/R_z$	1,40	1,88	1,21	$\mu\text{m}$	Valor de Pico do Perfil de Rugosidade, ( $\geq 1$ ), Valores Altos Representam picos maiores
$l$	800	800	800	$\mu\text{m}$	Comprimento de amostragem ( <i>Cut-Off</i> )

Para fim de análise comparativa entre as rugosidades leva-se em consideração a rugosidade média, expressa com  $R_a$  na Tabela 8.

Por conseguinte, desprende-se que a menor rugosidade média é atribuída ao revestimento polido, com 0,964  $\mu\text{m}$  e a maior ao revestimento bruto com 6,407  $\mu\text{m}$ .

A rugosidade do material influencia diretamente na topografia da superfície do mesmo, ainda que de maneira microscópica, com alta relevância se submetido a um processo contínuo de desgaste.

No estudo Tribológico do sistema, o desgaste está relacionado com a topografia do material, onde a alta rugosidade oferece uma maior resistência ao movimento e, conseqüentemente, maior desgaste [43].



## 5 Considerações Finais

Após a apresentação e discussão dos resultados obtidos neste trabalho, se viabiliza certas considerações sobre o estudo tribológico da aplicação do revestimento de *Stellite 6* aspergido via HVOF em um substrato de aço inoxidável AISI 304. Tais considerações são apresentadas nos seguintes tópicos:

- I. As imagens capturadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), após tratamento e análise contribuíram para a verificação da qualidade da aspersão via HVOF visto a baixa ou não presença de poros, oxidações e vazios, constituindo então, em um revestimento mais denso e de melhor ancoragem, diminuindo a possibilidade de deslocamento ou fragilização do mesmo.
- II. Após análise dos dados obtidos experimentalmente e dos gráficos gerados para o perfil de microdureza das três amostras comparadas, é possível observar o grande diferencial da aplicação da camada revestida de *Stellite 6*, que elevou a dureza média do substrato de aço inoxidável AISI 304 de 192,5 HV para 527,5 HV na superfície.
- III. O ensaio de desgaste ocasionou, além de resultados diferentes do previamente esperado, uma nova questão a ser respondida, no próximo tópico. Com a aspersão da camada de *Stellite 6* percebeu-se que poderia haver um ganho ou uma perda de camada de resistência ao desgaste. O que balizaria tal resultado seria o acabamento superficial dado ao revestimento. Afinal, com um revestimento de acabamento bruto o material teve piora de aproximadamente 22,7% e uma melhora de 60,43% com revestimento polido.
- IV. Após o ensaio de rugosidade dos três corpos de prova, bem como o auxílio de pesquisas, percebeu-se que a resistência ao desgaste esta inversamente ligada à rugosidade do material. Desta maneira, quanto maior a rugosidade, menor será sua resistência ao desgaste, valorizando, assim, a necessidade do polimento das superfícies dos revestimentos após a aplicação.

## 6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros apresentam-se:

- Realizar o ensaio de corrosão no revestimento, no substrato e na interface entre estes;
- Caracterizar os materiais do revestimento e substrato no intuito de verificar fidedignidade de suas composições quando comparados à bibliografia e verificar, caso haja variações, o que acarretam as tais.

## 7 Referências

- [1] HUTCHINGS, I. M. *Tribology, friction and wear of engineering materials*, Cambridge, Butterworth Heinemann, 1992.
- [2] **ASTM G77-91: Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.**
- [3] Kato, K. Adachi, K., 2001, “**Wear Mechanisms**”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.
- [4] **ASTM G40-96: Standard Terminology to Wear and Erosion**
- [5] **ASM HANDBOOK – Friction, Lubrification and Wear Technology.** Volume 18. ASM International – The Materials Information Society, 1998.
- [6] Ohring, M. *Engineering materials Science*. San Diego: Academic Press, 1995.
- [7] Adachi, K., Hutchings, I. M. **Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test.** *Wear*, 23 – 29, 255, 2003.
- [8] Adachi, K., Hutchings, I. M. **Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion to test conditions and material hardness.** *Wear*, 258, 318 – 321, 2005.
- [9] Cozza, R. C., Souza, R. M., Tanaka, D. K. **Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel.** COBEM 2005 – 18<sup>th</sup> International Congresso f Mechanical Engineering. Ouro Preto – MG, 6 a 11 de novembro de 2005. Anais em CD ROM.
- [10] Kusano, Y., Hutchings, I. M. **Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test.** *Wear*, 258, 313-317, 2005.
- [11] Gee, M. G., Gant, A. J., Hutchings, I. M., Kusano, Y., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., von Stebut, J., Hatto, P., Plint, G. **Results from na interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test.** *Wear*, 259, 27 – 35, 2005.
- [12] LÓPEZ, D.; PAULO TSCHIPTSCHIN, A.; ALONSO FALLEIROS, N. **Sinergismo Erosión-Corrosión En Un Acero Inoxidable Martensítico Aisi 410 Erosion-Corrosion Synergism of an Aisi 410 Martensitic Stainless Steel.** v. 159, p. 53–60, 2009.
- [13] ASM INTERNATIONAL - Metals Handbook - vol 7 – **Power Metals**

**Technologies and Applications.** ASM Int., 1992.

[14] ASM International. **Handbook of Thermal Spray Technology.** ASM Int., 2004.

[15] COUTO L. C. O. **Informetalização - A metalização contra o desgaste na indústria do petróleo e a introdução do robô na prestação de serviços de metalização no brasil.** N° 3 , Ano 2. 2011.

[16] **Aspersão Térmica - A Aplicação de Revestimentos de Cromo Duro e os Riscos à Saúde e ao Meio Ambiente.** Acesso a internet. <http://www.rijeza.com.br/sites/default/files/aplicacao-revestimentos-cromo-duro-riscos-saude-meio-ambiente.pdf>. Acesso em out/2017.

[17] TAKIMI A., POSSAMAI L., BERGMANN C. P.. **Revestimentos depositados por aspersão térmica hipersônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro.** Acesso a internet: <http://www.rijeza.com.br/sites/default/files/revestimento-aspersao-termica-cromo-duro.pdf>. Acesso em out/2017.

[18] MARQUES, P. V. **Aspersão térmica.** Infosolda e Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

[19] MARANHO O. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente.** Tese. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

[20] PETROBRAS. N2568 - **Revestimentos Anticorrosivos Aplicados por Aspersão Térmica.** [S.l.]: PETROBRAS, 2011.

[21] VARGAS F, LATORRE G., URIBEI I. **Behavior of thermal spray coatings against hydrogen attack.** Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 2 Núm. 4. 2003.

[22] EL RAYES M. M., ABDO1 H. S., KHALIL1 K. A. Int. J. **Electrochem.** Sci. 8, 1117 – 1137. 2013.

[23] GUILMANY J.M., MIGUEL J.M., ARMADA S., VIZCAINO S., CLIMENT F. **Use of scanning white light interferometry in the characterization of wear mechanisms in thermal-sprayed coatings.** Materials Characterization 47, 307–314, 2001.

[24] MOTTA F. P., **Propriedades de revestimentos de nióbio obtidos por aspersão térmica a plasma sobre aço API 5L X65.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.

[25] RODRIGUEZ R. M. H. P., PAREDES R.S.C., WIDO S.H., CALIXTO A. **Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and by arc spray.** Surface Coatings Technology, 202:172–9. 2007.

[26] PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of Thermal Spray Coatings.** Second edition. John Wiley e Sons, Ltd Publishing. England 2008.

[27] BERNDT, C. C. et al. **Handbook of Thermal Spray Technology.** ASM International, Materials Park, Ohio, OH, 2004.

[28] MORSI M. S., EL GWAD S. S. S., SHOEIB A., AHMED K. F. Int. J. **Electrochem. Sci.**, 7, 2811 – 283. 2002.

[29] LIMA, C.C.; TREVISAN, R. **Aspersão térmica: fundamentos e aplicações** – 2ª edição revisada e ampliada/ Carlos Camello Lima, Roseana Trevisan, - Artliber. São Paulo. 2007.

[30] KURODA, Siji. 2008. **Warm spraying - a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles.** SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS. 2008, p. 17.

[31] THORPE, M. L. 1993. **Advanced materials and process**, v.143, n.5. Thermal Spray. 1993, pp. 50-61.

[32] KLASSEN, D. T. **HVOF Spritzsysteme.** HSU Hamburg (Helmut Schmidt Universität), 2007. Disponível em: <[http://www.hsu-hh.de/werkstoffkunde/index\\_8BBNpQHopSQm5Ply.html](http://www.hsu-hh.de/werkstoffkunde/index_8BBNpQHopSQm5Ply.html)>. Acesso em: Abril de 2018.

[33] Antony, K. C., 1983, **Wear resistant cobalt-base alloys**, Journal of Metals, February, pp.52-60.

[34] Crook, P. – Haynes International Inc., 1993, **Cobalt and Cobalt Alloys**, in ASM Handbook Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, vol. 2, 10th ed, OH: ASM Metals Park.

[35] **Ligas Metálicas Para Revestimentos Contra Desgaste** - Um Guia de Consulta Prático para Aplicações de Aspersão Térmica para Aumento de Vida Útil de Peças Industriais. Acesso a internet. <http://www.rijeza.com.br/revestimentos/revestimentos-metalicos/stellite-6>. Acesso em: Março de 2018.

[36] Karlsson, L., Abril, 2005, **“Aços Inoxidáveis Passado, Presente e Futuro”**, Revista Solução, pp 45 – 51.

[37] **ABC do Aço Inox.** Disponível em: <http://www.abinox.org.br/site/aco-inox-abc-do-aco-inox.php>. Acesso em set/2017.

[38] PADILHA, A. F., & GUEDES, L. C. (2004). **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades.** 1 – 150.

[39] RONZANI, Antonio Guilherme. **Resistência à Cavitação do Revestimento de Carbetto de Tungstênio Refundido via Laser de CO<sub>2</sub> Aplicado em Aço AISI 1020.** 2017. 121f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

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

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

[42] GHERKE, Gabriel Angelo. **Revestimento de Roscas Helicoidais Agrícolas a Base de CrC Depositado Via HVOF Posteriormente Irradiadas Com Laser de Nd YAGE De CO<sub>2</sub>.** 2017. 65F. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

[43] SOUZA, THALES SARDINHA GARCIA. **Efeito da Rugosidade no Desgaste de Punções de Conformação a Frio/ T. S. G. SOUZA – versão corr. –** São Paulo, 2016. 103p.