

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**RAFAEL ALVES COURTES**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS DE CARBETO DE TUNGSTÊNIO E CARBETO DE CROMO VIA HVOF FRENTE À FADIGA TÉRMICA**

**Alegrete  
2018**

**RAFAEL ALVES COURTES**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS DE CARBETO DE TUNGSTÊNIO E CARBETO DE CROMO VIA HVOF FRENTE À FADIGA TÉRMICA**

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

Orientadora: Ana Cláudia Costa de Oliveira

**Alegrete  
2018**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS DE  
CARBETO DE TUNGSTÊNIO E CARBETO DE CROMO VIA HVOF FRENTE  
À FADIGA TÉRMICA**

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

Orientadora: Ana Cláudia Costa de  
Oliveira

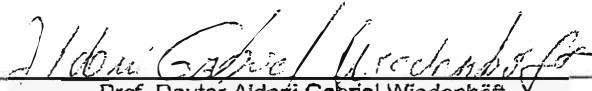
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06/12/2018

Banca examinadora:



---

Prof. Doutora Ana Cláudia Costa de Oliveira  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Doutor Aldoni Gabriel Wiedenhöft  
UNIPAMPA



---

Prof. Mestre Thiago da Silveira  
UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus que me proporcionou saúde e força e permitiu que tudo isso acontecesse.

A minha família, em especial meus pais Tania e Fortunato, minha irmã Aline e minha avó Idalina, que estiveram comigo em todos os momentos e não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida, e também, me deram todo o apoio e incentivo que para mim foram muito importantes.

A minha namorada Eduarda, sou muito grato por ter entrado na minha vida e pela compreensão com os momentos em que permaneci distante.

À professora Ana Claudia pela orientação, me ajudando bastante, esclarecendo todas as dúvidas que surgiam no decorrer deste trabalho.

A todos os professores do curso que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

A todos meus amigos que de alguma forma contribuíram e estiveram presentes em minha vida. Aos colegas de apartamento, que acompanharam minha jornada acadêmica, levarei para toda a vida a amizade feita com vocês.

Os técnicos dos laboratórios da Unipampa que me deram todo o auxílio com os processos experimentais.

A Rizeza Metalurgia que proporcionou todo o material necessário para a produção deste trabalho.

E, por fim, a todos que estiveram presentes nesse ciclo de conclusão acadêmica.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

## RESUMO

A fadiga térmica é um modo de falha que ocorre em materiais e equipamentos submetidos a mudanças bruscas e cíclicas de temperatura. Visando a maior vida útil de peças, o revestimento cerâmico é inserido como uma alternativa para prolongar o tempo de serviço de componentes mecânicos, de forma a aumentar a produtividade e reduzir custos com manutenção. Os revestimentos cerâmicos de Carbetos de Cromo (CrC) e Carbetos de Tungstênio (WC) são depositados por aspersão térmica via *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF), cuja função é aumentar a resistência à fadiga térmica. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a resistência frente à fadiga térmica, de revestimentos cerâmicos, visando à utilização do revestimento que mais se adequar ao ambiente de choque térmico. Para isto, realizou-se o ensaio de ciclagem térmica, avaliando a porosidade, micrografias, microdurezas e analisou-se as tensões térmicas dos revestimentos de CrC, WC e aço 1020, comparando-os. A partir dos ensaios realizados pode-se observar que o revestimento de CrC apresentou um melhor desempenho, resistindo ao choque térmico, em comparação ao WC o qual o revestimento saiu por completo do substrato. Além de apresentar menores níveis de inclusões os dois revestimentos também apresentaram menores valores de dureza após o ensaio.

Palavras-chave: aspersão térmica, carbeto de tungstênio, carbeto de cromo, fadiga térmica.

## ABSTRACT

Thermal fatigue is a failure mode that occurs in materials and equipment subject to sudden and cyclical changes in temperature. Aiming for longer parts life, the ceramic coating is inserted as an alternative to prolong the service life of the machinery, in order to increase productivity and reduce maintenance costs. The ceramic coatings of Chromium Carbide (CrC) and Tungsten Carbide (WC) are deposited by thermal spraying via *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF), whose function is increasing the resistance to thermal fatigue. Therefore, the present study had as objective to evaluate the resistance to thermal fatigue, of ceramic coatings, aiming at the use of the coating that best suits the thermal shock environment. For this, the thermal cycling test was carried out, evaluating the porosity, micrographs, microhardnesses and the thermal stresses of the CrC, WC and steel 1020 coatings were analyzed, comparing them. From the tests carried out it can be observed that the CrC coating presented a better performance, resisting the thermal shock, in comparison to the WC which the coating completely left the substrate. In addition to presenting lower inclusion levels, the two coatings also had lower hardness values after the test.

Keywords: thermal spraying, tungsten carbide, chromium carbide, thermal fatigue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região e aspecto de falha por fadiga térmica em matrizes de forjamento a quente .....	4
Figura 2 - Diferença de temperatura ao longo do corpo .....	5
Figura 3 - Ilustração das diferenças de temperaturas necessárias para falhas em cerâmicas .....	6
Figura 4 - Representação esquemática de aplicação do processo de aspersão térmica .....	7
Figura 5 - Sequência esquemática das características dos revestimentos por aspersão térmica .....	8
Figura 6 - Classificação dos métodos de deposição de aspersão térmica .....	9
Figura 7 - Pistola e esquema utilizado para aspersão térmica a plasma .....	10
Figura 8 - Esquema da pistola e formação do plasma de arco transferido e não transferido .....	11
Figura 9 - Ilustração da aspersão térmica por arco elétrico .....	12
Figura 10 - Esquema do funcionamento da pistola da aspersão por chama convencional .....	13
Figura 11 - Equipamento de aspersão térmica HVOF similar ao empregado neste trabalho e diagrama esquemático .....	15
Figura 12 - Fluxograma das etapas experimentais .....	18
Figura 13 – Equipamento utilizado para caracterizar o substrato .....	19
Figura 14 - Imagem representativa da amostra revestida por Carbetto de Tungstênio .....	19
Figura 15 - Imagem representativa da amostra revestida por Carbetto de Cromo.....	20
Figura 16 - Aspersão térmica HVOF .....	22
Figura 17 - Cortadora de precisão.....	23
Figura 18 - Embutidora metalográfica .....	24
Figura 19 - Lixadeira manual de 4 pistas .....	25
Figura 20 - Pano de polimento e Alumina .....	25
Figura 21 - Forno Mufla INTI .....	26
Figura 22 - Microscópio óptico .....	27
Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura .....	28
Figura 24 - Microdurômetro MicroMet .....	29
Figura 25 – Posição das endentações piramidais .....	30
Figura 26 - Morfologia do pó de WC (a) ampliado em 4000x (b) diâmetro dos elementos com ampliação de 500x .....	31
Figura 27 - Morfologia do pó de CrC (a) ampliado em 1000x (b) diâmetro dos elementos com ampliação de 500x .....	32
Figura 28 - WC após HVOF .....	33
Figura 29 - CrC após HVOF .....	34
Figura 30 - Micrografia das falhas do carbetto de tungstênio e carbetto de cromo .....	35
Figura 31 - Amostra de carbetto de cromo após ciclagem térmica em 900°C.....	36
Figura 32 - Amostra de carbetto de tungstênio após ciclagem térmica em 900°C .....	36
Figura 33 - MEV em WC .....	37
Figura 34 - MEV em CrC .....	38



Figura 35 - Média das microdurezas do revestimento de Carbetto de Tungstênio ....	40
Figura 36 - Média das microdurezas do revestimento de Carbetto de Cromo .....	41
Figura 37 - Análise das tensões térmicas do aço, WC e CrC.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis aplicações dos revestimentos HVOF em diversos ramos industriais .....	14
Tabela 2 - Parâmetros característicos e diferença dos processos de aspersão térmica .....	16
Tabela 3 - Características do Carbetto de Tungstênio .....	20
Tabela 4 - Características do Carbetto de Cromo .....	20
Tabela 5 – Características da ciclagem térmica.....	27
Tabela 6 - Composição química do substrato .....	31
Tabela 7 - Grandezas do aço, WC e CrC.....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – *American Iron and Steel Institute*

APS – Plasma de Arco Não Transferido

AS – Arco Elétrico

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AT – Aspersão Térmica

CrC – Carbetto de Cromo

FS – *Flame Spraying*

HVOF – *High Velocity Oxygen Fuel*

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NiCr – Níquel Cromo

PTA – Plasma de Arco Transferido

WC – Carbetto de Tungstênio

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivo geral .....	2
1.3	Objetivos específicos .....	2
1.4	Justificativa.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Fadiga térmica .....	4
2.2	Revestimento por Aspersão Térmica (AT) .....	7
2.2.1	Aspersão térmica por Plasma (Plasma Spraying) .....	9
2.2.2	Aspersão térmica por Arco Elétrico ( <i>Arc Spraying</i> ).....	11
2.2.3	Aspersão térmica a combustão por chama ( <i>Flame Spraying, FS</i> ).....	12
2.2.4	Aspersão térmica a chama oxicomustível de alta velocidade (HVOF) .....	13
2.2.5	Revestimento de Carbetto de Cromo (CrC).....	16
2.2.6	Revestimento de Carbetto de Tungstênio (WC) .....	17
3	METODOLOGIA .....	18
3.1	Materiais .....	18
3.2	Revestimentos por aspersão térmica pelo método HVOF .....	21
3.3	Procedimento metalográfico .....	22
3.3.1	Corte .....	22
3.3.2	Embutimento .....	23
3.3.3	Lixamento e polimento .....	24
3.4	Ensaio de ciclagem térmica .....	25
3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV .....	27
3.6	Perfil de microdureza .....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1	Material como recebido .....	30
4.1.1	Análise química .....	30
4.1.2	Análise dos pós dos revestimentos .....	31
4.1.3	Micrografia dos revestimentos .....	32
4.2	Resistência ao choque térmico .....	34
4.3	Microscopia eletrônica de varredura – MEV.....	37
4.4	Perfil de Microdureza .....	39
4.5	Dilatação térmica .....	41

5 CONCLUSÕES .....	44
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	44
REFERÊNCIAS .....	45

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A constante fomentação da indústria, aliada a competitividade em todos os setores organizacionais, está forçando as empresas a terem maior flexibilidade, tanto na redução dos preços dos produtos vendidos, quanto nas suas estratégias para ganhar mercado dentre seus concorrentes (Moreira, 2017). Desta forma, torna-se essencial a redução de custos nos processos, pois, faz-se necessário, cada vez mais, maximizar os lucros, aumentar a produtividade e sempre reduzir custos (Rocha, 2007). Diversos processos, tais como, fabricação de peças e equipamentos, a partir da conformação mecânica, necessitam de máquinas que possuam produção em grande escala. A manutenção constante destas tem sido um processo complexo, visto que toda a linha de produção tem que ser parada para realização de correções (Marson, 2014; Moreira, 2017). Uma forma de resolver esse problema é a utilização de revestimentos que servem como proteção, e possuem diversas características conjuntas, podendo ser resistentes à fadiga térmica, a corrosão, ao desgaste, tornando-se uma proteção totalmente eficiente contra diversos fatores que ocasionam falha à peça (Da Silva et al., 2015).

Através da *American Society for Testing and Materials* (ASTM E1823) (2013) tem-se a definição de fadiga como um “processo de degradação estrutural progressivo, permanente e localizado, que ocorre em materiais os quais podem culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos”. A fadiga térmica é um modo de falha importante que ocorre em materiais e equipamentos submetidos a mudanças bruscas e cíclicas de temperatura, como em usinas termoelétricas, cilindros de laminação, matrizes de forjamento a quente, turbinas a gás, motores diesel, turbinas de aeronaves entre outros (Júnior, 2006). As modificações das propriedades nos materiais são impactantes e negativas ao ponto de influenciar diretamente na resistência do equipamento.

Sendo assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de reduzir os desgastes gerados por fadiga térmica a fim de evitar a abertura de trincas e da falha total do material. Visando a maior vida útil de peças, o revestimento cerâmico é inserido como uma alternativa para prolongar o tempo de serviço de equipamentos

mecânicos, de forma a aumentar a produtividade e reduzir custos com manutenção (Almeida, 2005).

Os revestimentos cerâmicos de Carbetos de Cromo e Carbetos de Tungstênio são empregados com a função de aumentar a resistência à fadiga térmica (Limar, 2014), onde é aplicada uma camada de deposição por aspensão térmica, utilizando o processo de *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) produzindo um revestimento denso e com um ótimo acabamento superficial (Lima e Guilemany, 2006). Estes revestimentos cerâmicos têm o intuito de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais e por consequência diminuir custos com manutenção e melhorar a produtividade das indústrias (Da Silva, 2015).

Este trabalho tem a proposta de mostrar o quanto viável é a utilização de revestimentos cerâmicos submetidos a locais que envolvam aquecimento e resfriamento repetidamente, podendo, conforme sua resistência à fadiga térmica, aumentar a vida útil e reduzir custos em peças e equipamentos.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a resistência frente à fadiga térmica, de revestimentos cerâmicos pelo método de aspensão térmica HVOF, visando à utilização do revestimento que mais se adequar ao ambiente de ciclagem térmica.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Avaliar a resistência à ciclagem térmica dos revestimentos;
- Comparar a porosidade, morfologia e microdureza dos materiais cerâmicos revestidos;
- Analisar o acabamento superficial e a interface entre o aço 1020 e os revestimentos.

## **1.4 Justificativa**

As organizações buscam cada vez mais um desempenho de excelência e o setor de manutenção que antes tinha uma imagem de gerador de custos à empresa

passa a ter papel importante na competitividade (Moreira, 2017). A adoção de novas práticas de manutenção que visem evitar a ocorrência de falhas não planejadas é fundamental para minimizar impactos no processo produtivo, equipamentos e sistemas, a fim de buscar a melhoria e eficácia, evitando assim perdas de produção (Rocha, 2007).

Buscando oferecer novas soluções em termos de melhoria do desempenho, confiabilidade e durabilidade dos revestimentos tradicionais, os estudos realizados em cima dos revestimentos para fadiga térmica seguem sendo uma constante (Limar, 2014). No que tange à capacidade de ser um isolante térmico, os revestimentos para fadiga térmica são indiscutíveis. Por outro lado, quando se leva em consideração suas propriedades mecânicas e sua durabilidade, as mesmas se alteram das mais variadas formas e com diversas variáveis, entre as quais podemos destacar as condições do processo, materiais escolhidos, tratamentos realizados e condições de operação que o material se encontra durante o ciclo de serviço (Da Silva et al., 2015).

Tendo em vista que mesmo a menor das melhorias atingidas no desempenho do material em serviço ou no seu ciclo de vida traz contribuição científica e tecnológica, os estudos devem seguir avançando para que se superem os obstáculos oferecidos pelas condições de serviço em temperaturas cada vez mais elevadas e atmosferas distintas (Limar, 2014). Desta forma, torna-se imprescindível analisar revestimentos cerâmicos por meio de choque térmico e a partir dos dados obtidos, definir parâmetros a fim de utilizar o revestimento de carbetos de cromo e carbetos de tungstênio como barreira térmica para evitar o desgaste por fadiga térmica.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nessa revisão inicialmente serão abordados alguns conceitos referentes à fadiga térmica, sua definição e características. Na sequência são apresentados os tipos de aspersão térmica com enfoque no HVOF como técnica do revestimento e por fim são apresentadas as ligas cerâmicas utilizadas para o revestimento do substrato.

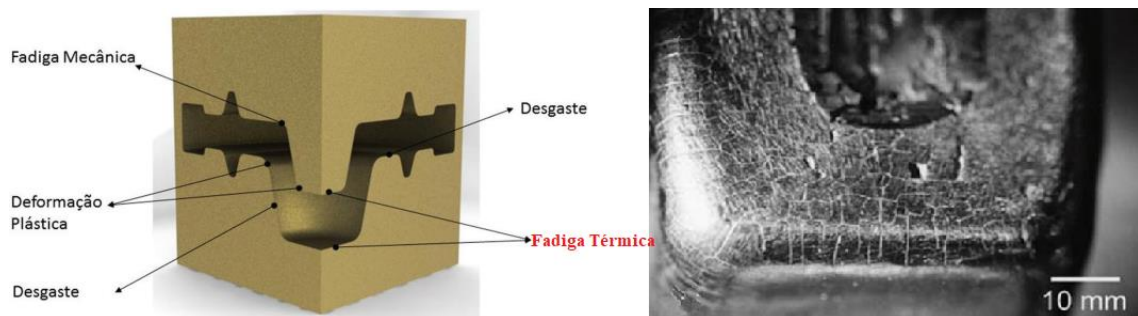


## 2.1 Fadiga térmica

A Fadiga Térmica ocorre pelo processo de carregamento repetitivo de ciclos térmicos, bastante comuns em várias aplicações industriais, no qual as tensões e deformações podem ser resultantes unicamente do gradiente de temperatura. As falhas recorrentes são ocasionadas pela flutuação cíclica que o material é submetido e resultam em trincas ou redes de trincas (Junior, 2006; Quintela, 2011).

Quando as tensões de rupturas são menores que as tensões geradas no material, ocorre à nucleação e propagação de trincas, danificando a estrutura do material (Cintra et al., 2008). De acordo com Junior (2006), as trincas térmicas ou *heat checking* geradas pelas tensões térmicas são perpendiculares à superfície, devida ser o início das dilatações, seguido de contrações a cada ciclo. A Figura 1 demonstra os mecanismos de falha presentes na ferramenta de forjamento a quente, com a possível região em que a fadiga térmica pode atuar, com a origem na superfície da matriz. O aspecto típico das fissuras geradas é de trincas na forma de malhas situadas em prensas excêntricas de forjamento (Magalhães et al., 2014).

Figura 1 - Região e aspecto de falha por fadiga térmica em matrizes de forjamento a quente



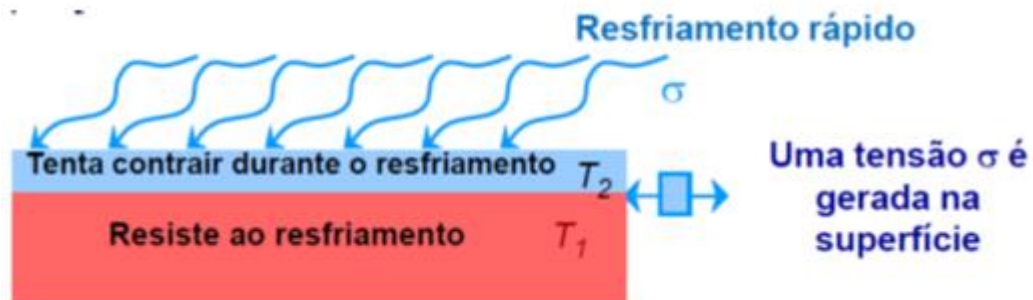
Fonte: Adaptado de Magalhães et al., 2014.

No aquecimento, o aumento da temperatura na superfície causa uma expansão volumétrica, resultando em um estado de tensões compressivo do material. Essas tensões, quando superiores ao limite de escoamento, geram deformação plástica ao material. No entanto, durante o resfriamento, acontece o contrário, as deformações são recorrentes do estado de tensões trativos e em uma temperatura de menor ductilidade. Quanto maior as dilatações e contrações,

maiores serão as deformações, assim como o aumento de trincas causadas pelos ciclos térmicos (Ferreira, 2001).

A diferença de temperatura ao longo de um corpo faz com que preceda na superfície o aquecimento ou arrefecimento mais rapidamente do que no interior dele, dessa forma, são geradas tensões térmicas (Claro, 2013), como ilustrado na Figura 2 para um resfriamento.

Figura 2 - Diferença de temperatura ao longo do corpo



Fonte: Adaptado de Silva, 2003.

De acordo com Silva (2003), a tensão resultante da diferença de temperatura pode ser dimensionada pela equação:

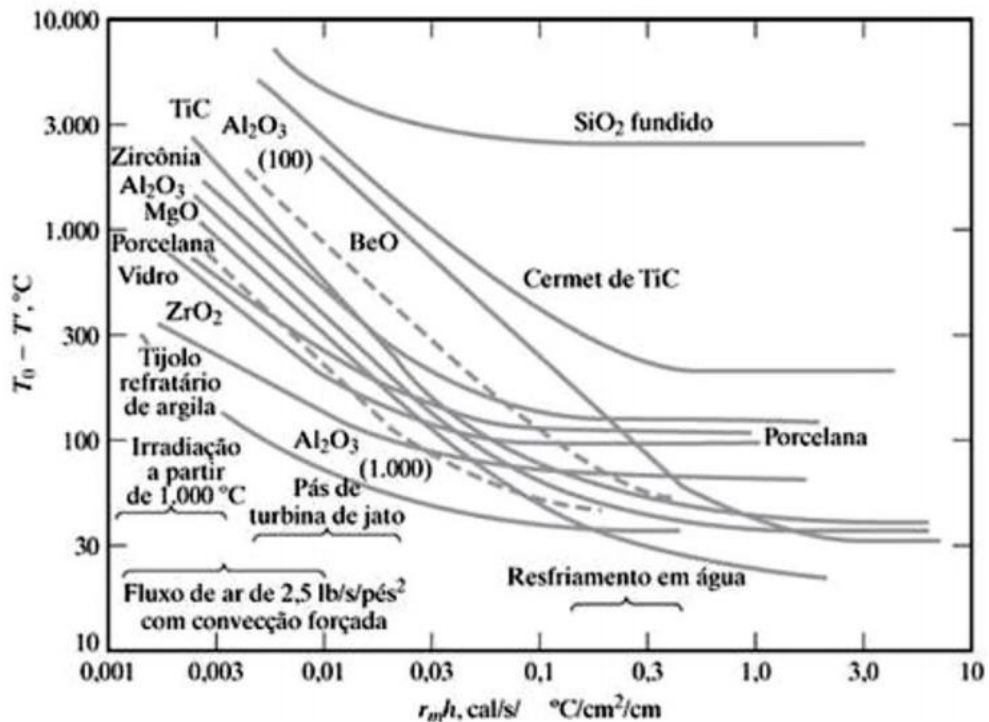
$$\sigma = -E\alpha(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade;
- $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do material;
- $(T_1 - T_2)$  é a diferença de temperatura.

A capacidade de um material resistir a bruscas diferenças de temperaturas depende de uma combinação de fatores, como a condutividade térmica, geometria geral, fragilidade e expansão térmica do material (Claro, 2013). A Figura 3 apresenta as diferenças de temperaturas necessárias para a falha de materiais cerâmicos.

Figura 3 - Ilustração das diferenças de temperaturas necessárias para falhas em cerâmicas



Fonte: Marinho, 2016.

A diferença de temperatura ( $T_0 - T'$ ) necessária para a falha é traçada em função do parâmetro ( $r_m h$ ) de transferência de calor, onde a região correspondente ao resfriamento em água gira em torno de 0,3 (Marinho, 2016). O material cerâmico por ser pouco dúctil pode levar à propagação de trincas com maior facilidade, a partir de defeitos superficiais durante o resfriamento, com tensões trativas que são as mais suscetíveis à falha (Claro, 2013).

As variações térmicas em revestimentos cerâmicos têm efeitos comportamentais tanto na interface entre o revestimento e substrato como nas demais camadas, em função da magnitude de tensões. As falhas podem ser progressivas ou imediatas a partir de deteriorações e também pelo descolamento entre o revestimento e o material base (Uchôa, 2007). Os modelos de trincas gerados no revestimento podem ser fechados quando houver o aquecimento onde há uma compressão a partir da expansão térmica (Júnior, 2006).

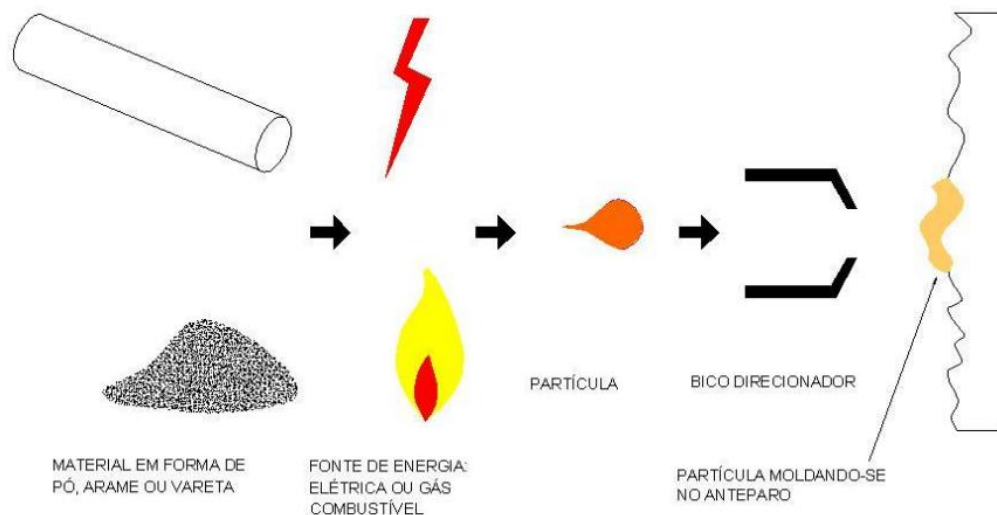
Em função dos diferentes estados de tensões ocasionados pelas diferenças de temperaturas no ambiente de ciclagem térmica, são comuns as alterações microestruturais, no volume e oxidações internas e externas (Ferreira, 2001).

## 2.2 Revestimento por Aspersão Térmica (AT)

A aspersão térmica é um grupo de processos em que materiais metálicos ou não metálicos são depositados, fundidos ou semifundidos, formando uma camada protetora, comumente chamada de revestimento. É bastante eficiente para proteção contra desgastes, oxidação, falhas térmicas, incompatibilidades físicas e biológicas e outras aplicações. Os materiais utilizados como revestimentos na aspersão podem estar na forma de pó, vareta, cordão ou arame (Lima e Trevisan, 2007; Paredes, 2012).

De acordo com a literatura, o processo de aspersão (Figura 4) se dá a partir de uma fonte de geração de calor, sendo gás combustível (combustão) ou energia elétrica (arco elétrico), ocasionando a fundição ou semifundição das partículas que são aceleradas por um gás comprimido, colidindo com o substrato e aderindo nas irregularidades da superfície.

Figura 4 - Representação esquemática de aplicação do processo de aspersão térmica



Fonte: Paredes, 2012.

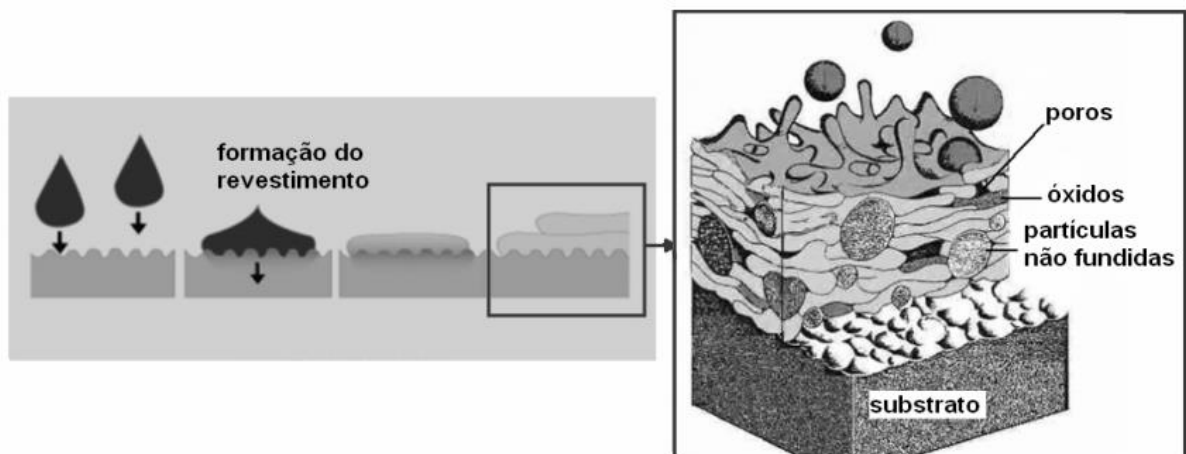
De acordo com Maranhão (2006), a superfície a ser aspergida deve estar previamente preparada no que diz respeito à rugosidade, limpeza e aquecimento, para ter uma boa adesão. As partículas aspergidas no substrato são aderidas por mecanismos de natureza mecânica, química-metalúrgica, física ou uma combinação

dessas formas, dependendo da temperatura da fonte de aquecimento e propulsão das partículas.

Segundo Lima e Trevisan (2007), a estrutura dos revestimentos aspergidos é formada por lamelas sobrepostas, devido ao espalhamento das partículas do pó, fundida ou semifundida, ao impactar no substrato. As camadas subsequentes são formadas a partir das partículas solidificadas no substrato, pois o tempo de solidificação é menor que o tempo de projeção, que é de 0,01s. O baixo tempo de solidificação permite também, o revestimento de materiais com menores temperaturas de fusão em relação ao material do revestimento.

A Figura 5 representa a formação do revestimento por aspersão térmica. Tem-se o início com a projeção das partículas, impactando com o substrato, espalhando-se sobre a base, a solidificação e contração das lamelas. No detalhe é possível a visualização das características do revestimento (Maranho, 2006).

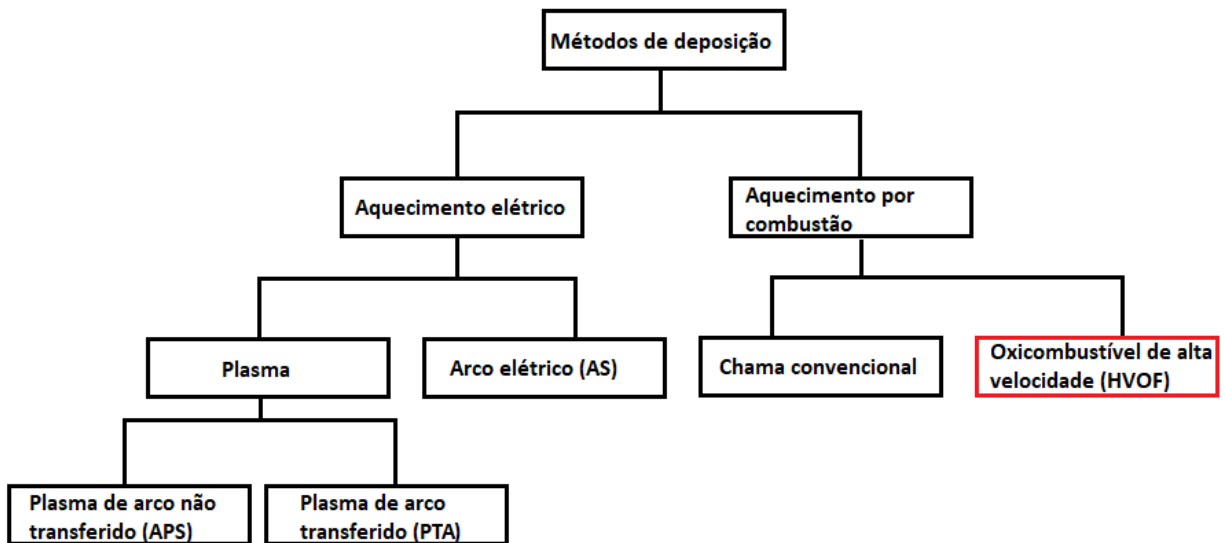
Figura 5 - Sequência esquemática das características dos revestimentos por aspersão térmica



Fonte: Maranho, 2006.

Os processos de deposição por aspersão térmica são classificados em grupos em função da fonte de aquecimento, por combustão e grupo elétrico. A combustão se dá pela queima ou explosão de misturas de gases e a fonte de calor do grupo elétrico tem como mecanismo o arco elétrico (Mariano, 2008). A Figura 6 ilustra essa classificação, com o processo HVOF em destaque.

Figura 6 - Classificação dos métodos de deposição de aspersão térmica



Fonte: Autoria própria.

### 2.2.1 Aspersão térmica por Plasma (Plasma Spraying)

Plasma é o nome dado aos gases submetidos a níveis energéticos superiores ao do estado gasoso normal, no qual certa porção das partículas são ionizadas. As moléculas gasosas quando fornecido energia seguem as leis da física e da termodinâmica, diferente do plasma, que tem um comportamento segundo leis próprias, o que lhe dá o título de quarto estado da matéria (Gonçalves, 2012).

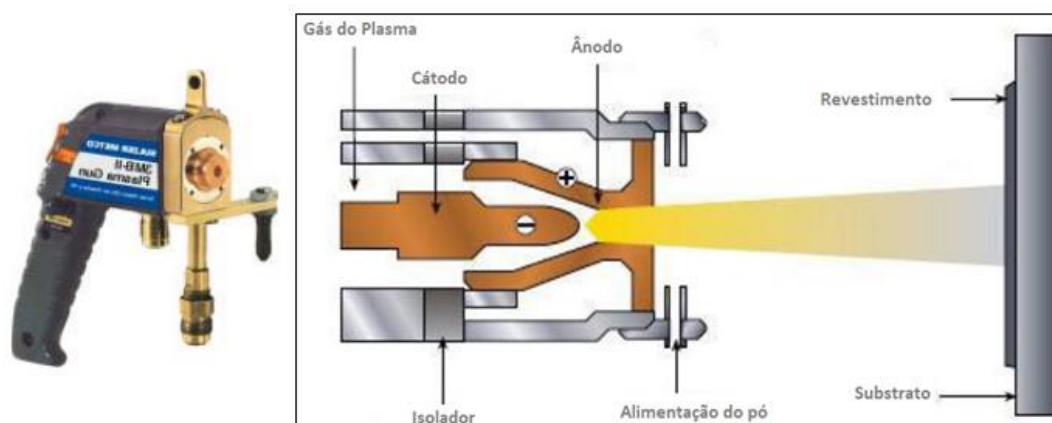
Segundo Kaefer (2004), quando se aumenta o nível energético dos gases diatômicos ou multiatômicos, as moléculas se dissociam formando átomos independentes. Prosseguindo com o fornecimento de energia ocorre o aumento do nível energético que é proporcional ao aumento da temperatura até ocorrer a ionização dos átomos. Com isso, ocorre a separação de elétrons dos átomos e o gás se torna um condutor elétrico. Com relação a gases nobres ou monoatômicos, o mesmo processo tem a sequência similar, porém, sem a dissociação das moléculas.

A aspersão térmica por plasma utiliza um arco elétrico constringido para gerar energia térmica, fundindo os materiais utilizados para o revestimento. De acordo com Lima e Trevisan (2007), a constrição serve para controlar a densidade da energia do fluxo do arco. Os materiais comumente utilizados nos processos de aspersão térmica por plasma são os que exigem temperaturas mais elevadas que

nos processos a combustão ou arco elétrico, para ocorrer fusão e aquecimento, como óxidos e carbonetos (Gonçalves, 2012).

Emprega-se geralmente gases como argônio, nitrogênio, hélio, hidrogênio ou mistura para formação do plasma e para aumentar o nível energético e a velocidade deles (Gonçalves, 2012). A Figura 7 mostra no detalhe um esquema do processo de aspersão a plasma de arco não transferido. No equipamento faz-se passar uma corrente de gás ou mistura de gases através de um arco elétrico que se forma entre um eletrodo (cátodo) de tungstênio e o orifício (ânodo) de cobre.

Figura 7 - Pistola e esquema utilizado para aspersão térmica a plasma

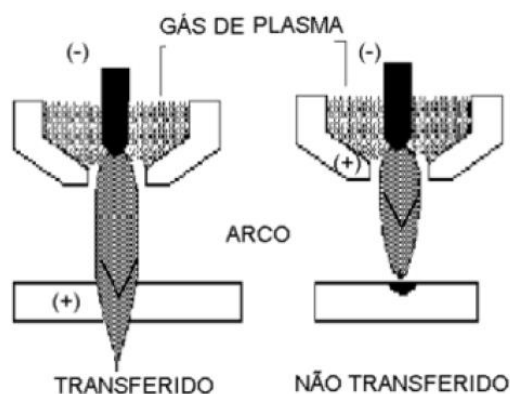


Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2012.

O gás é aquecido nesse arco elétrico, criando uma zona de altíssima temperatura, onde injeta-se o pó que é fundido, superaquecido e acelerado com altas velocidades até o substrato (Paredes, 2012).

Na aspersão térmica de arco transferido, os processos são similares, porém o arco atinge o substrato para fechar o circuito elétrico, sendo necessário o substrato ser de material condutor e que possa suportar alguma deformação. PTA é também conhecido como uma combinação de processos de soldagem e aspersão. Produz um revestimento de alta densidade e alta taxa de deposição por passe e utiliza uma menor energia necessária do que o processo de APS (Olivio, 2012). A Figura 8 mostra o esquema do PTA e APS.

Figura 8 - Esquema da pistola e formação do plasma de arco transferido e não transferido



Fonte: Paredes, 2012.

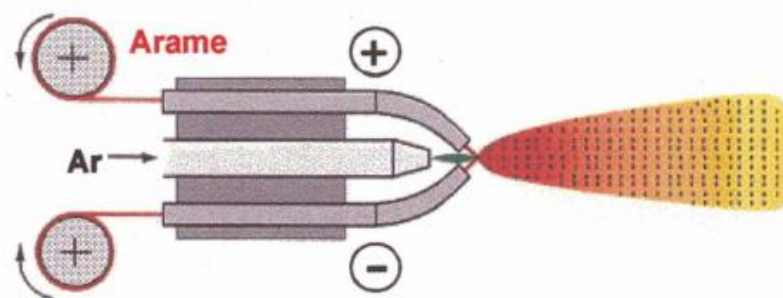
Para toda operação realizada pela aspersione térmica a plasma, utiliza-se um retificador de corrente contínua para alimentar o arco e um painel central que controla os fluxos de gases do plasma e da água de refrigeração (Lima, 2004).

### 2.2.2 Aspersione térmica por Arco Elétrico (*Arc Spraying, AS*)

Esse processo consiste na fusão de um arco elétrico a partir de dois eletrodos, cátodo e ânodo, consumíveis em forma de arame. Por uma fonte de corrente contínua os arames tornam-se energizados e conforme o avanço torna-se constante é formado o arco voltaico. O material é fundido simultaneamente e é expelido por um jato de ar comprimido sobre o substrato, devidamente preparado, para formar o revestimento (Guerrero et al., 2006). Na Figura 9 é possível a visualização do processo AS.



Figura 9 - Ilustração da aspersão térmica por arco elétrico



Fonte: Boccanera, 1999.

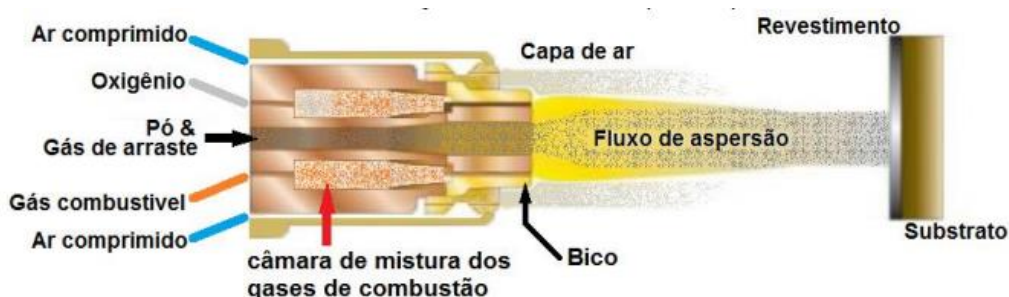
O principal objetivo do arco elétrico é aumentar a temperatura de aquecimento do material para obter taxas de deposição maiores, tendo em vista que a temperatura do arco elétrico é maior do que um processo por chama combustível. O processo AS permite a obtenção de um revestimento com aderência ao substrato adequada, podendo ter diversas aplicações (Filho, 2004).

### 2.2.3 Aspersão térmica a combustão por chama (*Flame Spraying, FS*)

Foi o primeiro processo de aspersão térmica a ser desenvolvido, é bastante usado por sua facilidade de manuseio e baixo custo do equipamento. É utilizado a combustão como gerador de calor, com a mistura de oxigênio e gases combustíveis (acetileno, propano, hidrogênio, gás natural, propadieno) para fundir o material de deposição. Os materiais da deposição são fornecidos na forma de pó ou arame e podem ser metais, materiais cerâmicos e plásticos (Cardozo, 2014).

Na Figura 10 são mostrados os componentes da aspersão térmica à combustão por chama com deposição por pó. A mistura dos gases no bico da pistola efetua a combustão para fundir o material do revestimento e utilizando um jato de ar comprimido as partículas são projetadas ao substrato (Capra, 2005).

Figura 10 - Esquema do funcionamento da pistola da aspersão por chama convencional



Fonte: Sucharski, 2016.

#### 2.2.4 Aspersão térmica a chama oxicomustível de alta velocidade (HVOF)

Por fim, o método escolhido para os revestimentos dos substratos utilizados neste trabalho. De acordo com Sucharski (2016), o HVOF surgiu no início dos anos oitenta como uma alternativa ao processo de aspersão por chama convencional, com revestimentos mais densos e com menores níveis de poros e óxidos.

Devido o baixo custo e a flexibilidade de aplicação da aspersão térmica via HVOF, diversas indústrias estão optando pelo processo para a deposição de revestimentos (Magnani, 2008). Na Tabela 1 são apresentados alguns ramos da indústria que utilizam o revestimento pela técnica HVOF.

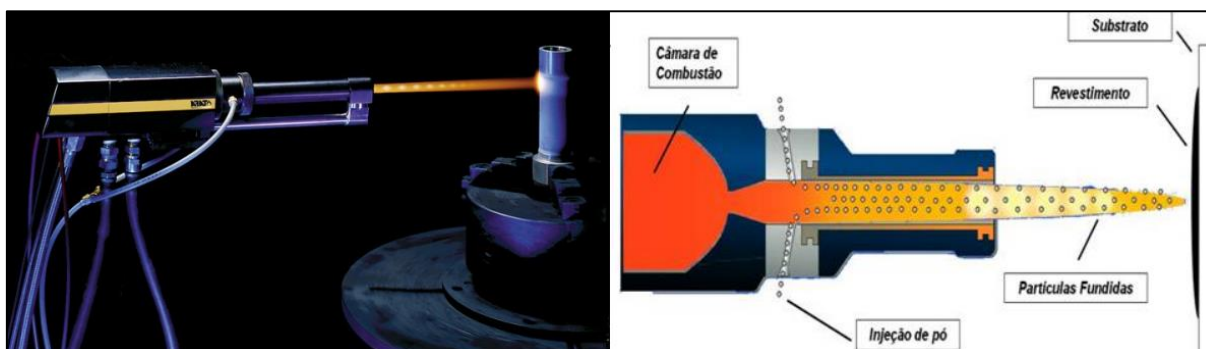
Tabela 1 - Possíveis aplicações dos revestimentos HVOF em diversos ramos industriais

Ramo Industrial	Aplicação	Material
Indústria de papel	Cilindros, Condutos.	WC-Co (Cr), Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Indústria de aço	Rolos para sistemas de transporte em fábricas	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr, Cr <sub>3</sub> O <sub>2</sub> -NiCr
Indústria de impressão	Rolos ou cilindros de regulagem	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Indústria têxtil	Rolos ondulados	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>
Acessórios	Válvulas isoladoras, torneira.	WC-Co+ WC-Ni, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr
Eletrônica	Trilhas condutoras	Cu
Planta de construção	Ferramentas, separadores, equipamentos químicos.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mo; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mo; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mo
Indústria automobilística	Discos de fricção, Aros de Pistão.	Mo
Indústria aeronáutica	Componentes hidráulicos	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr

Fonte: Magnani, 2008.

Na Figura 11 é apresentado um desenho esquemático do processo de HVOF. A geração de calor ocorre com a mistura de combustível e oxigênio em uma câmara de combustão. A alta pressão dentro da câmara de combustão gera um jato de exaustão com velocidades supersônicas. O material de deposição em forma de pó é introduzido axialmente no bocal por um gás de arraste (nitrogênio), sendo fundido ou semifundido com o calor da combustão e expelido para o substrato com a alta velocidade do fluxo de aspersão (Paredes, 2012).

Figura 11 - Equipamento de aspersão térmica HVOF similar ao empregado neste trabalho e diagrama esquemático



Fonte: Adaptado de Takimi, 2004.

O gás combustível usualmente utilizado é o propano, propileno, metil-acetileno-propadieno, hidrogênio e querosene. Os sistemas que utilizam querosene líquido como combustível fornecem pressões de combustão maiores tornando maiores as velocidades do fluxo de deposição. As partículas dos pós que são utilizados na alimentação do HVOF variam de 5 a 45  $\mu\text{m}$  e a taxa de alimentação varia de 20 a 80 g/min. A distância necessária para deposição do revestimento varia de 120 a 300 mm. As taxas de vazão do gás combustível estão entre 40 e 60 L/min e o fluxo de oxigênio é de 430 L/min. Grande parte dos pós utilizados no HVOF por aspersão térmica são formados por carbonetos (Magnani, 2008).

De acordo com Lima e Trevisan (2007), as altas velocidades das partículas (1200 m/s), faz com que o material a ser revestido tenha um alto impacto com o substrato não precisando estar totalmente fundido para tornar o revestimento de qualidade. Com isso, os defeitos de tensões residuais diminuem devido ao não superaquecimento das partículas.

Na Tabela 2, há uma comparação entre processos da aspersão térmica e estão destacadas as características do processo por HVOF, como baixo nível de porosidades e óxidos.

Tabela 2 - Parâmetros característicos e diferença dos processos de aspersão térmica

Característica	Processos		
	Chama (pó)	Plasma	HVOF
Vazão de Gases (m <sup>3</sup> /h)	11	4,2	28-57
Temperatura média (°C)	2200 - 3200	5500 - 14000	2700 - 3100
Atmosfera em torno da gotícula	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Velocidade de impacto (m/s)	30 - 150	800	400 - 1200
Aderência relativa (MPa)	4 - 20	15 - 70	> 36
Coesão interlamelar	Baixa	Alta	Muito Alta
Teor de óxidos (%)	0,4 - 10	0,5 - 1	0,2 - 5
Teor de Poros (%)	5 - 15	1 - 7	< 3
Custo relativo (1 a 10)	3	5	5
Taxa de deposição máxima (kg/h)	7	5	14
Potência (kW)	25-75	30-80	100-270
Energia para Fusão (kW/kg)	11-22	12-22	22-200

Fonte: Olivio, 2012.

### 2.2.5 Revestimento de Carbeto de Cromo (CrC)

Carbeto de Cromo possui a fórmula química CrC e é um composto inorgânico pertencente ao grupo dos materiais cerâmicos. Possui ótima resistência a altas temperaturas, ao desgaste e a corrosão. Os carbeto são compostos resistentes mecanicamente por ter ligações químicas covalentes, podendo ser de diversas estequiometrias e estruturas. Os metais de adição para formação das ligações dos carbeto possuem estabilidade química de ordem crescente: ferro, cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio, nióbio e titânio. Contudo, os carbeto a base de cromo possuem boa disponibilidade para aplicações e baixo custo (Macedo et al. 2008).

Segundo Paredes (2012), os materiais carbeto dispostos na aspersão térmica apresentam-se na forma de pós e seus revestimentos têm ótimas

propriedades quando aplicados por HVOF. O carbeto de cromo é resistente a altas temperaturas de serviço, e quando misturado em uma matriz de níquel cromo (NiCr) pode-se trabalhar com temperaturas mais elevadas ainda e continua resistente ao desgaste abrasivo. De acordo com Lima et al. (2009), os carbetos de cromo agem como barreiras, ao corte e ao sulcamento, de partículas abrasivas que causam o desgaste abrasivo.

Segundo Souza (2017), o revestimento de carbeto de cromo possui um bom controle de fricção por ser um material duro e resistente. Quanto maior a espessura deste revestimento por deposição via HVOF, maior a densificação e menor a passagem de eletrólito que causa a corrosão e desgaste diminuindo a vida útil do componente.

Dessa forma, o revestimento de carbeto de cromo pode ter uma boa eficiência quando solicitado a ciclagens térmicas, devido a sua resistência a altas temperaturas.

#### **2.2.6 Revestimento de Carbeto de Tungstênio (WC)**

Carbeto de tungstênio possui a fórmula química WC, fazendo parte do grupo de materiais cerâmicos, é um composto inorgânico e possui partes iguais de carbono e tungstênio. De acordo com Kaefer (2004), o carbeto de tungstênio como revestimento vem sendo utilizado em diversas aplicações, bem como, substituindo devido às restrições ambientais, o cromo duro, que possui uma boa resistência contra desgastes em materiais metálicos.

O revestimento de carbeto de tungstênio, em forma de pó, é um dos mais utilizados nas indústrias em sistemas automotivos, aeroespaciais, de transporte e de geração de energia. A utilização desse revestimento nas diversas áreas da engenharia ocorre devido à excelente resistência à erosão e ao desgaste, tendo em vista, que há uma combinação de uma matriz metálica tenaz com partículas duras de carbeto (Kaefer, 2004).

Segundo Panziera (2016), o carbeto de tungstênio possui alta temperatura de fusão (2800°C), alto módulo de elasticidade (696 GPa), baixo coeficiente de expansão térmica ( $5,2 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ ) e elevada dureza (18 a 22 GPa) que permanece estável até a temperatura de 1000°C. Devido a essas características e elevadas

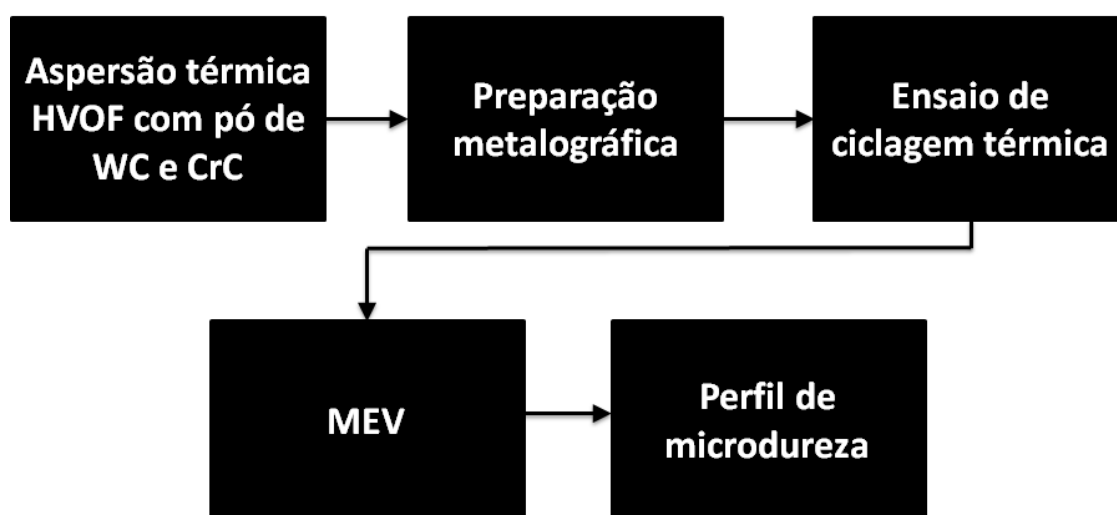
propriedades mecânicas, o WC é muito utilizado na produção de matrizes de conformação, ferramentas de usinagem e de corte, mecânica, rolamentos, contatos elétricos e recobrimentos e selos mecânicos.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção estão apresentados os procedimentos e etapas dos ensaios realizados. O fluxograma da Figura 12 ilustra a organização experimental utilizada no andamento do trabalho.

Figura 12 - Fluxograma das etapas experimentais

#### Organização experimental



Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 Materiais

Para determinar a caracterização do substrato em que ocorreu a deposição do revestimento foi necessário à realização do ensaio de espectrometria de emissão óptica.

O espectrômetro usado fica localizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Pampa campus Alegrete, de marca Anacom Científica, modelo B2 Advanced, mostrado na Figura 13.

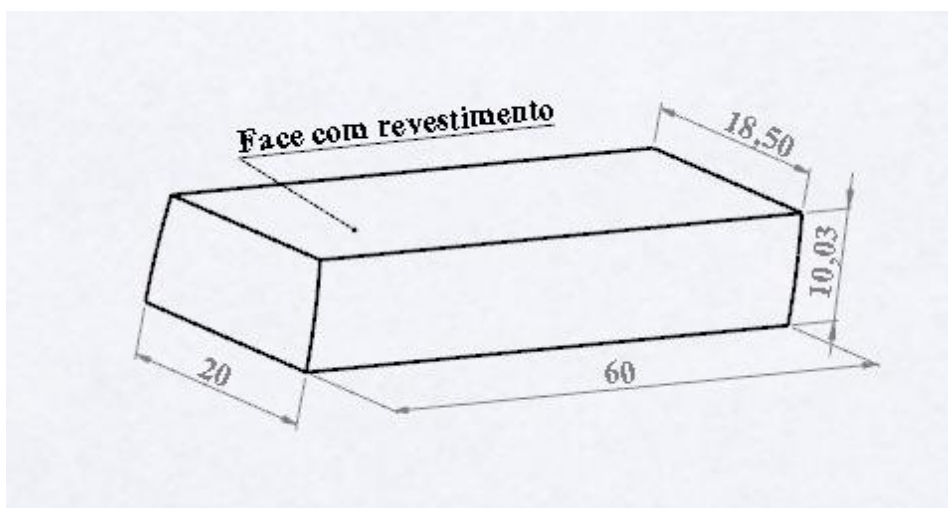
Figura 13 – Equipamento utilizado para caracterizar o substrato



Fonte: Autoria própria

As amostras foram aspergidas pelo método HVOF alimentados de pó de WC e CrC, fornecidos pela empresa Rijeza Metalurgia, nos quais as dimensões em milímetros de cada uma estão ilustradas na Figura 14 e Figura 15.

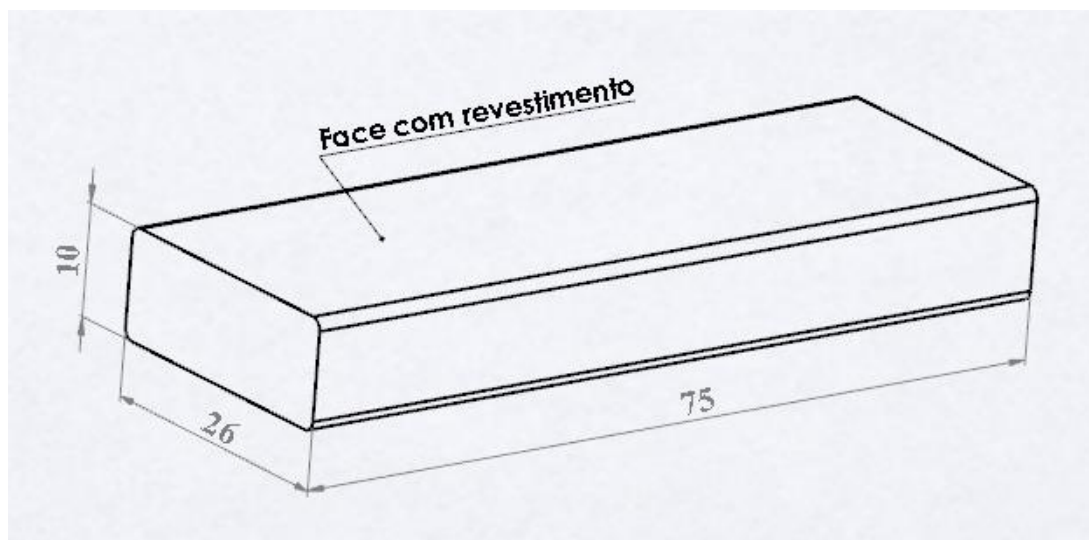
Figura 14 - Imagem representativa da amostra revestida por Carbetto de Tungstênio



Fonte: Autoria própria.



Figura 15 - Imagem representativa da amostra revestida por Carbeto de Cromo



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os fornecedores dos revestimentos utilizados na deposição, algumas características do Carbeto de Tungstênio (Tabela 3) e Carbeto de Cromo (Tabela 4):

Tabela 3 - Características do Carbeto de Tungstênio

Propriedades físicas	Características
Microdureza	1200 a 1350 HV
Porosidade	<1%
Temperatura máxima de trabalho	450°C
Adesão	>10.000 PSI
Camada máxima	0,5 mm

Tabela 4 - Características do Carbeto de Cromo

Propriedades físicas	Características
Microdureza	1000 a 1200 HV
Porosidade	1 a 1,5%
Temperatura máxima de trabalho	850°C
Adesão	>10.000 PSI
Camada máxima	0,5 mm

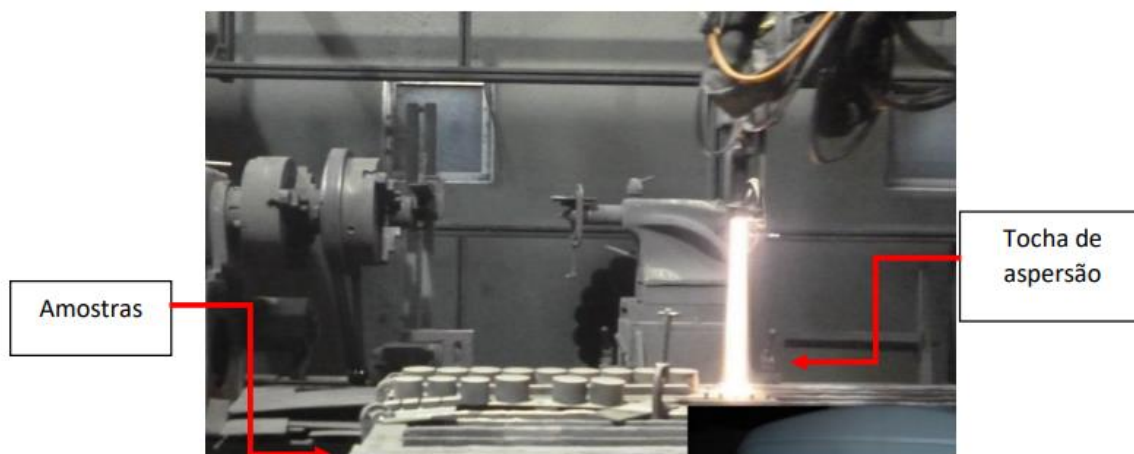
A morfologia e o tamanho das partículas dos pós de carbetos de cromo e carbetos de tungstênio podem ser vistas pela análise de alta resolução microestrutural. O modo de fabricação dos pós dos revestimentos determina a sua morfologia. As partículas dos pós influenciam diretamente no revestimento, visto que, ocorre a troca de calor entre as partículas e os gases de combustão, possuindo diferenças na capacidade de absorver energia térmica. A morfologia também influencia na estrutura da camada, pois, as partículas ao se chocarem com o substrato durante o processo de deposição se deformam e se distribuem formando o revestimento (Souza, 2017).

A análise de alta resolução microestrutural das partículas dos pós foi feita a partir do Microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo EVO MA10 de marca Zeiss, localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Pampa campus Alegrete.

### **3.2 Revestimentos por aspersão térmica pelo método HVOF**

O procedimento de aspersão térmica foi realizado na empresa Rijeza Metalurgia, onde, inicialmente os corpos de prova passaram por uma preparação do substrato com jato abrasivo por granalha de óxido de alumínio  $Al_2O_3$  para retirar todas as impurezas contidas e tornar a superfície com uma rugosidade propícia para melhor adesão do revestimento. Após a limpeza, as amostras foram encaminhadas para a aplicação dos revestimentos de Carbetos de Tungstênio e Carbetos de Cromo utilizando o equipamento de aspersão Praxair-TAFA JP-5000 HP/HVOF, este com movimentos robóticos sendo pré-programado para uma camada final de revestimento de 0,15 milímetros. A Figura 16 mostra o equipamento que foi utilizado e o posicionamento das amostras que recebem o revestimento.

Figura 16 - Aspersão térmica HVOF



Fonte: Souza (2017).

### 3.3 Procedimento metalográfico

Para a análise microestrutural das amostras, recebidas após a aspersão térmica e também após o ensaio de ciclagem térmica foi necessário a preparação metalográfica, realizada no Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa. Os procedimentos utilizados foram o corte, embutimento, lixamento e polimento.

#### 3.3.1 Corte

Para obter amostras menores que fossem compatíveis com a embutidora e com o MEV foram realizados os cortes da peça. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada revestimento de WC e CrC. Utilizou-se a Cortadora Metalográfica de precisão modelo IsoMet 1000 da marca Buehler, com disco de corte diamantado com giro de 850 r.p.m. lubrificado por fluido refrigerante e com carga mecânica sobre a peça de 0,5 Kg, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Cortadora de precisão



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.2 Embutimento

Foi utilizado o embutimento a quente com baquelite para compactar as amostras, para evitar o abaulamento durante o lixamento e para realização dos ensaios de microdureza. Este procedimento contou com o equipamento de embutimento da marca Fortel, modelo EFD30, com controle de pressão manual e utilizando como pressão de trabalho 1000 lbf/pol<sup>2</sup>, como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Embutidora metalográfica



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Lixamento e polimento

Após o embutimento, foi realizado o lixamento das amostras até obter uma superfície polida, para posteriormente visualizar a microestrutura no MEV, com lixas de granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 grãos/pol<sup>2</sup>, rotacionando em 90 graus a posição da amostra entre cada troca de lixa. O equipamento utilizado para realização deste procedimento é uma lixadeira manual da marca Fortel, modelo LMF, com quatro pistas de lixamento fixadas por barras pressionadoras para não enrugarem as lixas, possui também saída para recolhimento da água utilizada no processo, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Lixadeira manual de 4 pistas



Fonte: Autoria própria.

Após o lixamento, as amostras foram polidas com o auxílio de um pano de polimento (Figura 20) e um agente abrasivo de Óxido de Alumínio (Alumina), a fim de eliminar todos os riscos superficiais para o melhor acabamento possível.

Figura 20 - Pano de polimento e Alumina



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Ensaio de ciclagem térmica

A ciclagem térmica das amostras revestidas de Carbetto de Tungstênio e Carbetto de Cromo foi realizada no Laboratório de Química e Metalografia

pertencente a Unipampa, Campus Alegrete, com um forno Mufla da marca INTI modelo 1300/7E com o auxílio do software Flycon programando a curva de temperatura para aquecimento a 7°C/min. A Figura 21 mostra o forno utilizado.

Figura 21 - Forno Mufla INTI



Fonte: Autoria própria.

As amostras passaram por ciclos bruscos de altas e baixas temperaturas, cada ciclo teve duração de 35 minutos com as amostras sendo inseridas no interior do forno Mufla INTI com a temperatura já elevada e após esse tempo sendo imersas em água a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) em um tanque de fundo reforçado de tecidos para que a amostra amortecesse com a queda. Para cada material revestido tinha-se 3 amostras, dividindo-as e inserindo no forno nas temperaturas de 300, 600 e 900°C.

Inicialmente tinha-se como ideia completar 3 ciclos para cada amostra, porém, com o auxílio do Microscópio óptico (Figura 22), também situado no Laboratório de Química e Metalografia da Unipampa, foi possível analisar a partir de cada ciclagem térmica as modificações sofridas pelo processo e com 3 ciclos não seriam suficientes para ter-se resultados posteriormente.

Figura 22 - Microscópio óptico



Fonte: Autoria própria.

Então, foram realizados 6 ciclos para cada amostra, podendo já observar bastante alterações microestruturais. Os números de ciclos juntamente com as temperaturas utilizadas estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da ciclagem térmica

<b>Amostras</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Ciclos de 35 min</b>
<b>1</b>	CrC	300	6
<b>2</b>	CrC	600	6
<b>3</b>	CrC	900	6
<b>4</b>	WC	300	6
<b>5</b>	WC	600	6
<b>6</b>	WC	900	6

Fonte: Autoria própria

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A análise microestrutural das amostras revestidas com WC e CrC foi possível após a ciclagem térmica, utilizando o MEV e obtendo imagens de alta resolução, sendo mais eficaz do que demais microscópios por utilizar feixe de elétrons. As imagens obtidas tiveram ampliação de 200x, 500x, 700x e 800x. O microscópio



eletrônico utilizado é da marca Zeiss, modelo EVO MA10, situado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autoria própria.

### 3.6 Perfil de microdureza

A realização deste ensaio necessitava que as amostras estivessem polidas com as superfícies espelhadas. O ensaio de microdureza foi realizado com um microdurômetro da marca Buehler modelo MicroMet 6010 (Figura 24), situado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa.

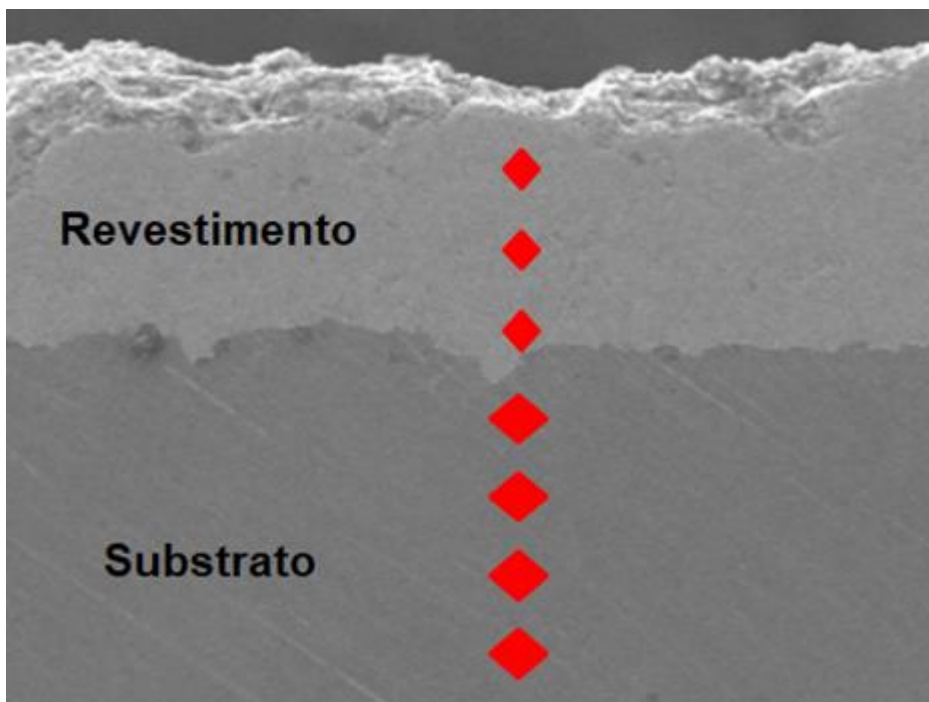
Figura 24 - Microdurômetro MicroMet



Fonte: Autoria própria.

O ensaio foi realizado em escala Vickers (HV) com endentador piramidal. A medição dos perfis de microdureza ocorreu com a aplicação de uma carga de 0,5 Kg durante o tempo de 10 segundos. As endentações foram feitas na superfície aspergida até o substrato das amostras, sendo 7 medições ao total. Foram feitas endentações próximas da ligação entre revestimento e substrato para não ocorrer o descolamento de material, sendo possível observar a grande diferença de dureza entre o substrato e a superfície aspergida. A Figura 25 ilustra as endentações realizadas no ensaio de microdureza.

Figura 25 – Posição das endentações piramidais



Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados por ordem da metodologia experimental conforme descrito anteriormente.

### 4.1 Material como recebido

Antes de realizar o ensaio de ciclagem térmica, precedeu-se a análise química do substrato, a análise dos pós dos revestimentos e das micrografias do WC e CrC.

#### 4.1.1 Análise química

Após a análise do ensaio de espectrometria óptica, obteve-se 0,23% de carbono na composição química dos substratos conforme a Tabela 6. De acordo com a ABNT/SAE J403, para uma variação de 0,18-0,23% de carbono, o aço pode ser denominado como aço-carbono AISI 1020.

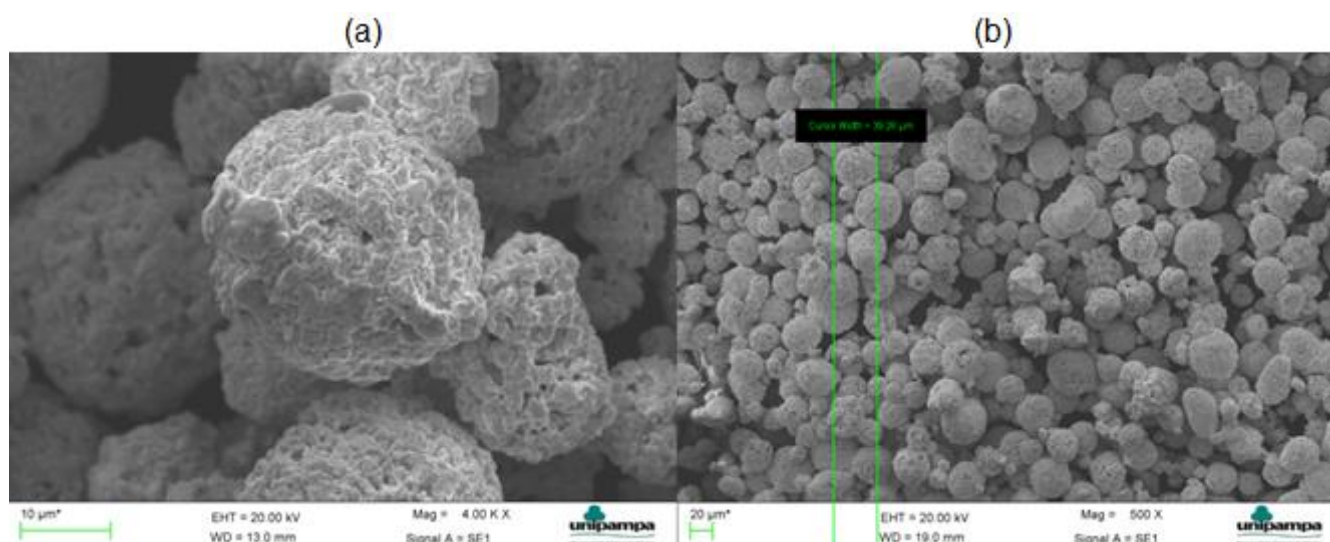
Tabela 6 - Composição química do substrato

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Nb</b>	<b>W</b>	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Al</b>
Valores	<b>0,23</b>	1,213	0,271	0,248	0,071	0,214	0,002	0,014

#### 4.1.2 Análise dos pós dos revestimentos

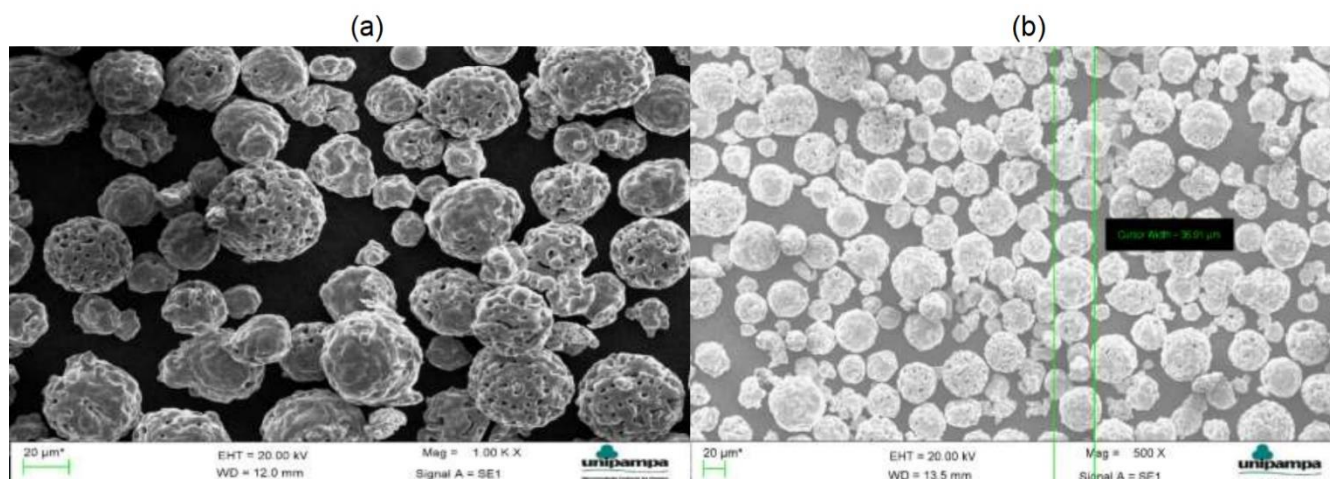
Com o auxílio do MEV foi possível realizar a análise microestrutural dos pós dos revestimentos de WC e CrC. As Figuras 26 e 27 de Panziera (2016) e Gehrke (2017) representam as mesmas partículas dos pós empregados para o revestimento das amostras deste trabalho.

Figura 26 - Morfologia do pó de WC (a) ampliado em 4000x (b) diâmetro dos elementos com ampliação de 500x



Fonte: Adaptado de Panziera (2016).

Figura 27 - Morfologia do pó de CrC (a) ampliado em 1000x (b) diâmetro dos elementos com ampliação de 500x



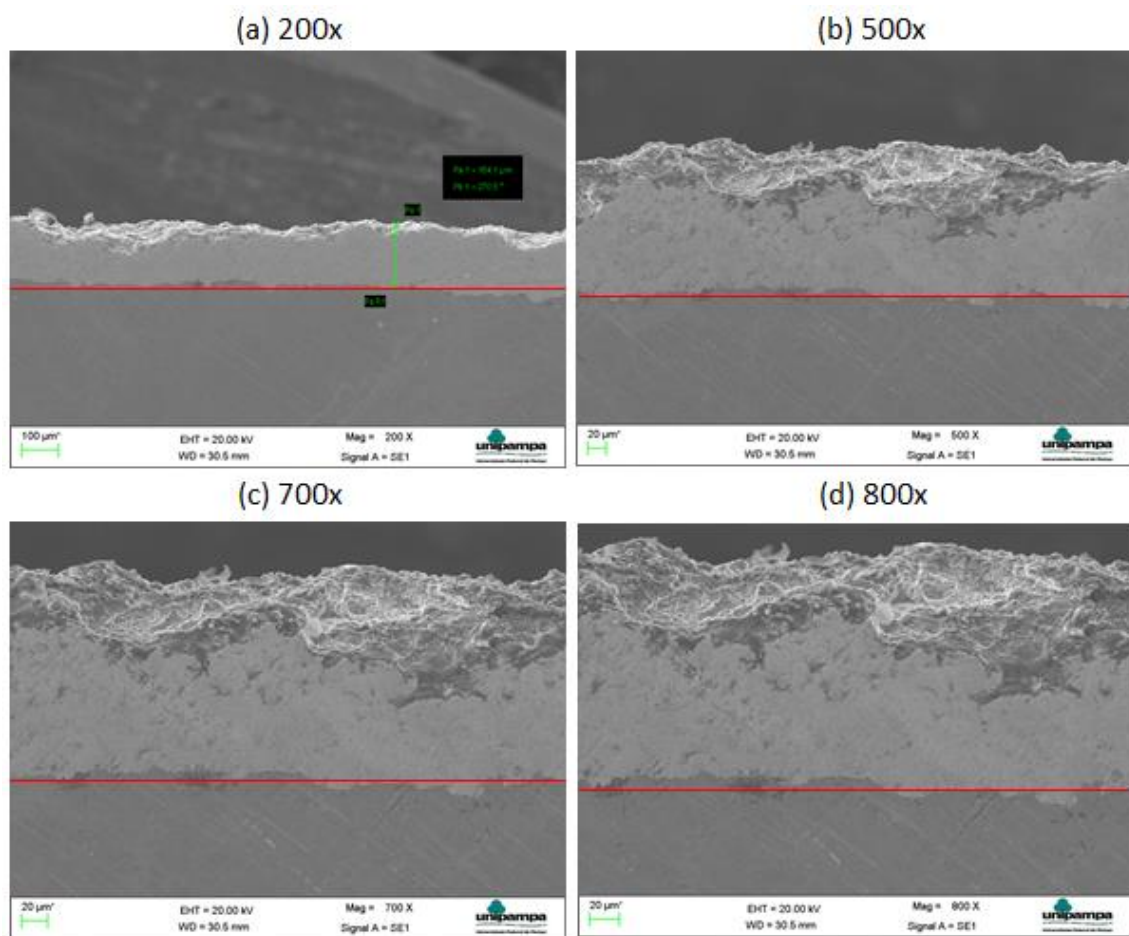
Fonte: Adaptado de Gehrke (2017).

Como mostrado nas Figuras 26 e 27, a morfologia dos pós são similares, ambas com o formato de partículas esféricas e com uma variação pequena do diâmetro das partículas, como demonstrado na Figura 26 (b)  $D = 35,91 \mu\text{m}$  e Figura 27 (b)  $D = 39,26 \mu\text{m}$ . A morfologia do pó de WC possui uma maior aproximação e uma distribuição mais compacta das partículas, já o pó de CrC com partículas mais porosas e densas apresentam um maior espaçamento entre os grãos mas também com uma boa distribuição.

#### 4.1.3 Micrografia dos revestimentos

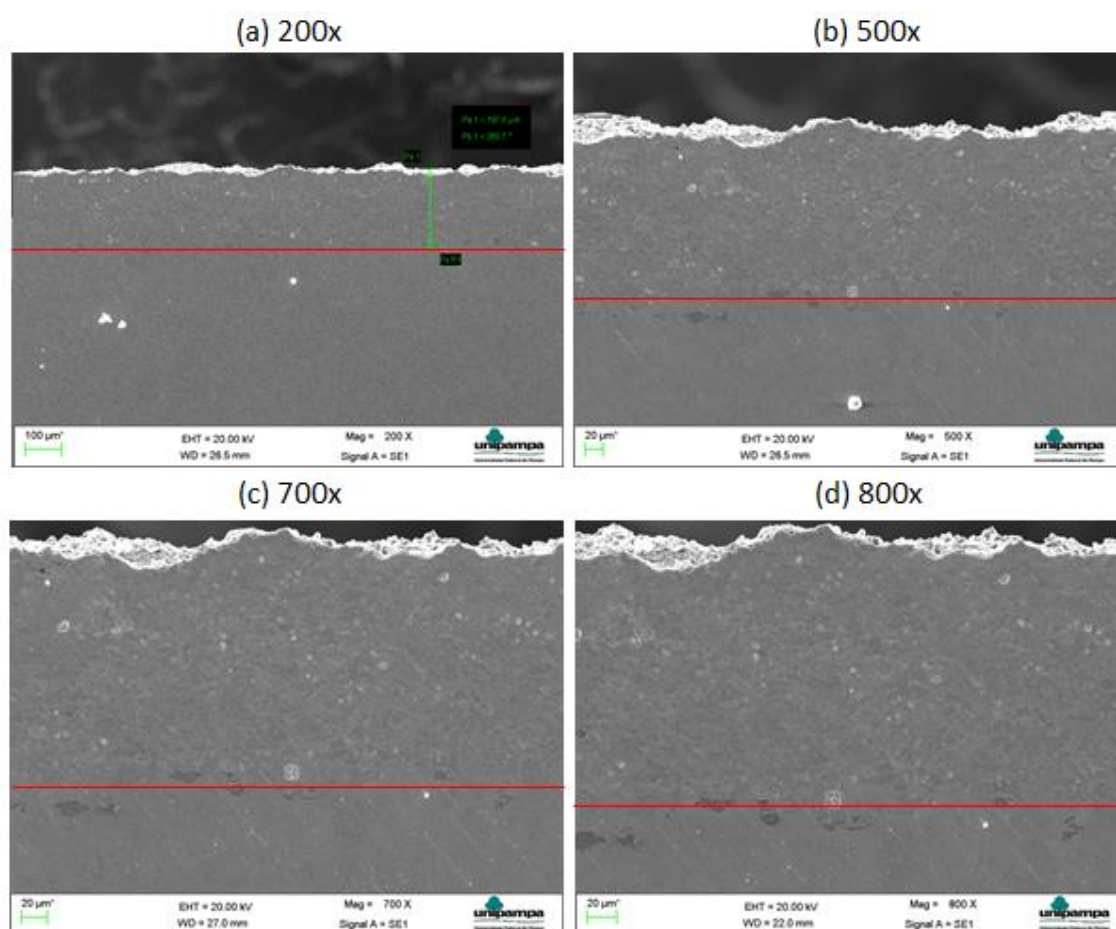
As micrografias foram feitas nos corpos de prova após a aspersão térmica. Foi possível observar a microestrutura em diferentes amplitudes, a espessura da camada de deposição do revestimento observada em  $164 \mu\text{m}$  no carbetto de tungstênio e  $190 \mu\text{m}$  no carbetto de cromo e a ligação entre o substrato e o revestimento, podendo posteriormente ser comparadas com as micrografias pós-ensaio de ciclagem térmica. A Figura 28 mostra as micrografias do carbetto de tungstênio e na Figura 29 as micrografias do carbetto de cromo.

Figura 28 - WC após HVOF



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - CrC após HVOF



Fonte: Autoria própria.

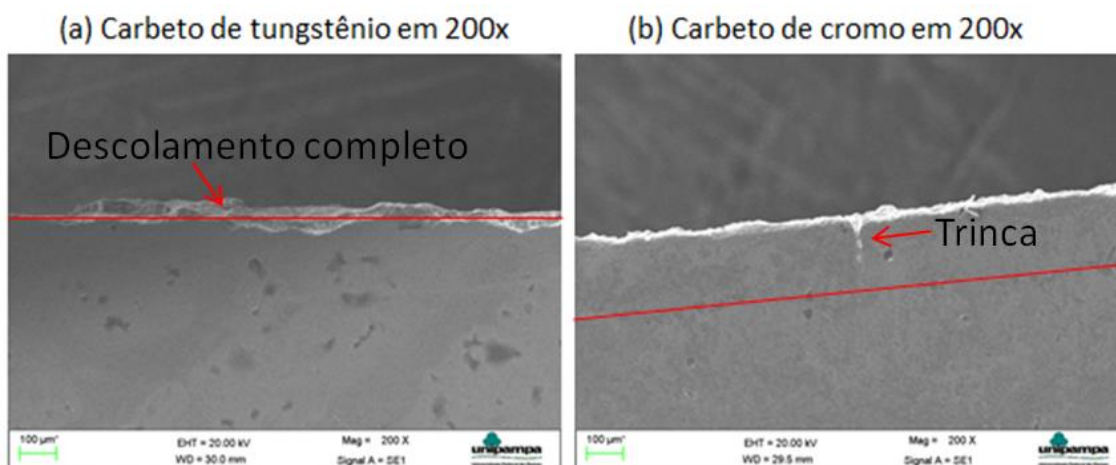
## 4.2 Resistência ao choque térmico

Conforme a descrição do ensaio da seção 3.4, foi possível avaliar a resistência à ciclagem térmica dos revestimentos de carbeto de tungstênio e carbeto de cromo.

Após a realização dos 6 ciclos térmicos para cada corpo de prova nas temperaturas de 300, 600 e 900°C, apenas 2 corpos de prova sofreram falhas e ruptura durante o processo de ciclagem térmica. Foi possível visualizar a falha no sexto ciclo térmico do revestimento de carbeto de tungstênio na temperatura de 900°C a partir do microscópio eletrônico, não sendo totalmente visível a olho nú. A amostra com o revestimento de WC apresentou falha total no revestimento, descolando completamente do substrato, já a amostra revestida de carbeto de cromo com o mesmo ciclo apresentou algumas trincas, mas apresentou uma melhor

adesão entre revestimento e substrato, como mostrado na Figura 30. Contudo, tiveram um ótimo desempenho diante do cenário favorável de geração de tensões térmicas.

Figura 30 - Micrografia das falhas do carbeta de tungstênio e carbeta de cromo



Fonte: Autoria própria.

As falhas ocorridas (descolamento no WC e trincas no CrC) podem ter tido início nos defeitos internos, devido todo material possuir poros, microtrincas e inclusões. Isso acontece devido a estes defeitos serem concentradores de tensões e com o resfriamento brusco pode iniciar a trinca e levar até a falha total (Da Silva, 2017).

As temperaturas utilizadas neste ensaio (300, 600 e 900°C) com o tempo de 35 minutos por ciclo, são capazes de gerar tensões térmicas suficientes para simular solicitações de serviço para esses tipos de revestimentos na indústria.

Na Figura 31 e 32 é possível visualizar as amostras de carbeta de cromo e carbeta de tungstênio após vários ciclos térmicos do ensaio, no qual, para o revestimento de CrC a superfície do substrato (aço AISI 1020) exposta ficou com a estrutura deteriorada, enquanto a superfície do revestimento continuou intacta. Na amostra de WC, o revestimento perdeu a adesão descolando do substrato e oxidando.



Figura 31 - Amostra de carbeto de cromo após ciclagem térmica em 900°C



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - Amostra de carbeto de tungstênio após ciclagem térmica em 900°C



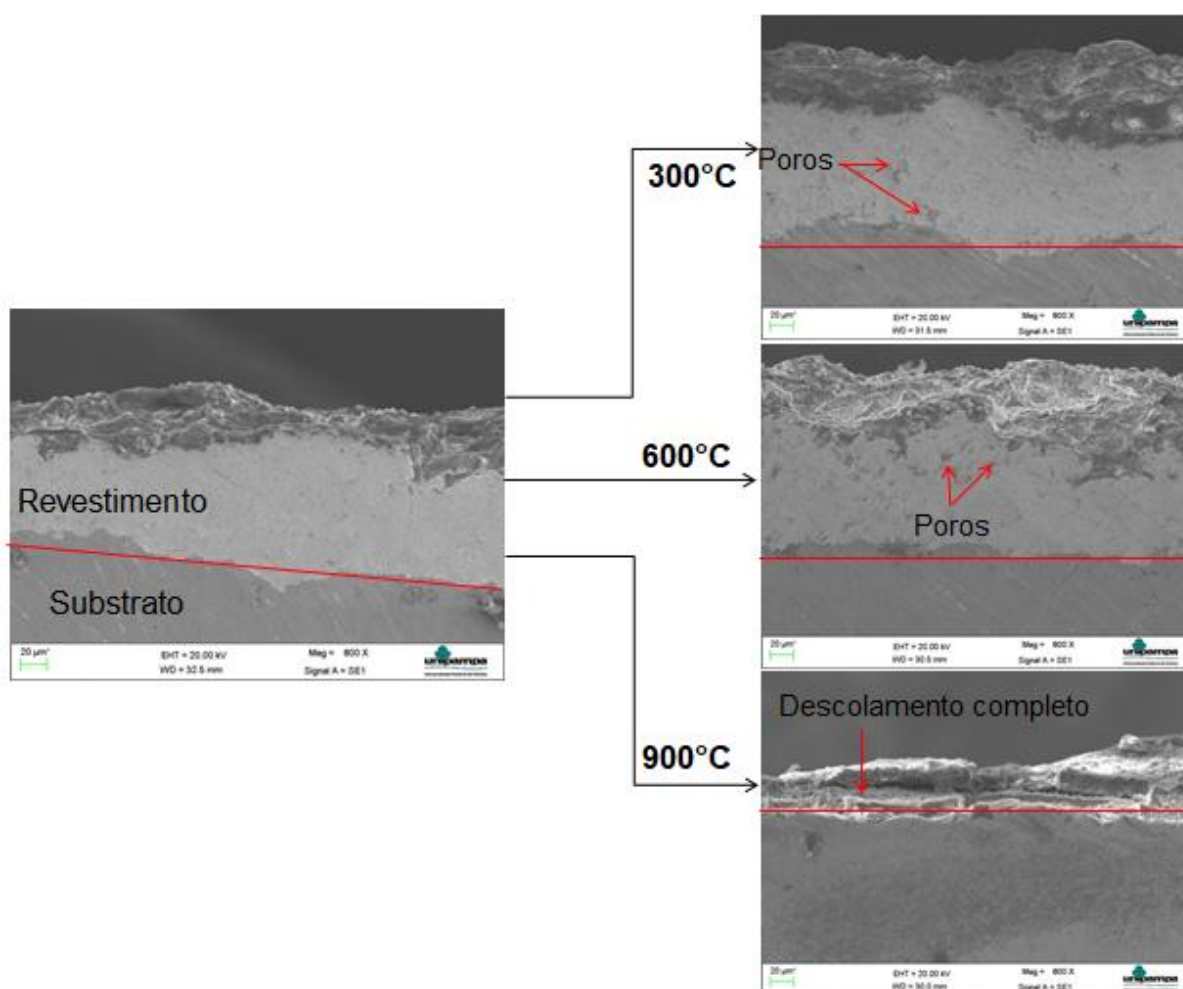
Fonte: Autoria própria.

Os demais corpos de prova que foram ensaiados com as temperaturas de 300 e 600°C tiveram boa resistência quando solicitados com as diferenças térmicas, mesmo que com ciclos térmicos propícios à geração de tensões.

#### 4.3 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Nesta seção serão apresentadas as micrografias realizadas com o MEV após o ensaio de ciclagem térmica. A Figura 33 mostra o revestimento de WC após a aspersão térmica e após os ensaios de 300, 600 e 900°C, com ampliações de 800x.

Figura 33 - MEV em WC

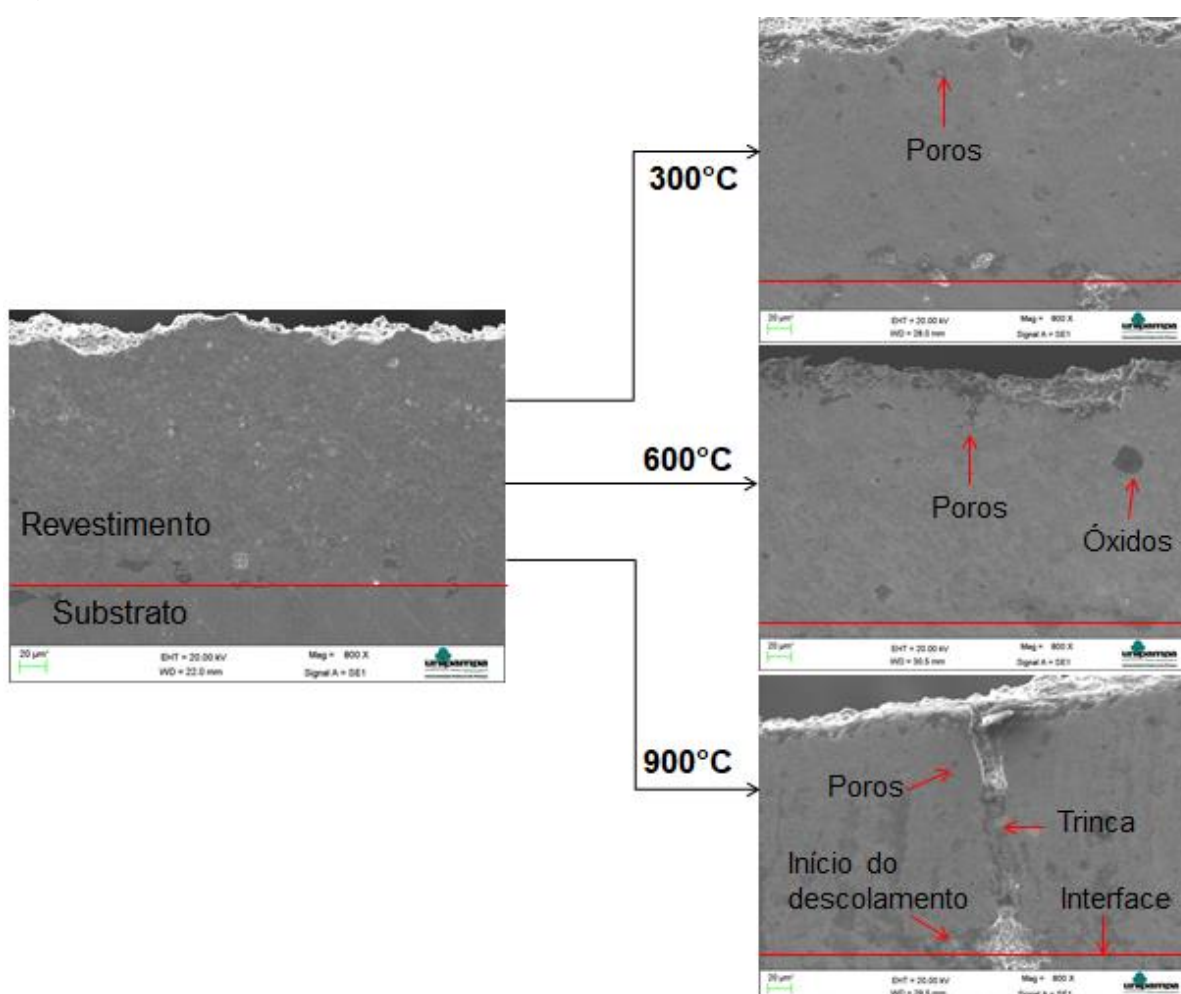


Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 33, observa-se que para os choques térmicos nas temperaturas de 300 e 600°C ambos os revestimentos se mostraram eficientes

resistindo ao descolamento, sem imperfeições na interface. No revestimento a 600°C pode-se observar o aumento da porosidade e uma diminuição na homogeneidade do revestimento, o que demonstra uma menor resistência à fadiga térmica comparado ao revestimento de CrC. Na temperatura de 900°C o WC não resistiu às ciclagens térmicas e descolou por completo. A Figura 34 mostra as imagens dos ciclos térmicos de CrC após a aspersão térmica e após os ensaios de 300, 600 e 900°C, com ampliações de 800x.

Figura 34 - MEV em CrC



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34, as temperaturas de 300 e 600°C permaneceram com boa adesão na interface, sem imperfeições e com baixos defeitos nos revestimentos, provavelmente vindos da fabricação. Os revestimentos de CrC apresentaram uma melhor densificação e homogeneidade da camada, conseqüentemente

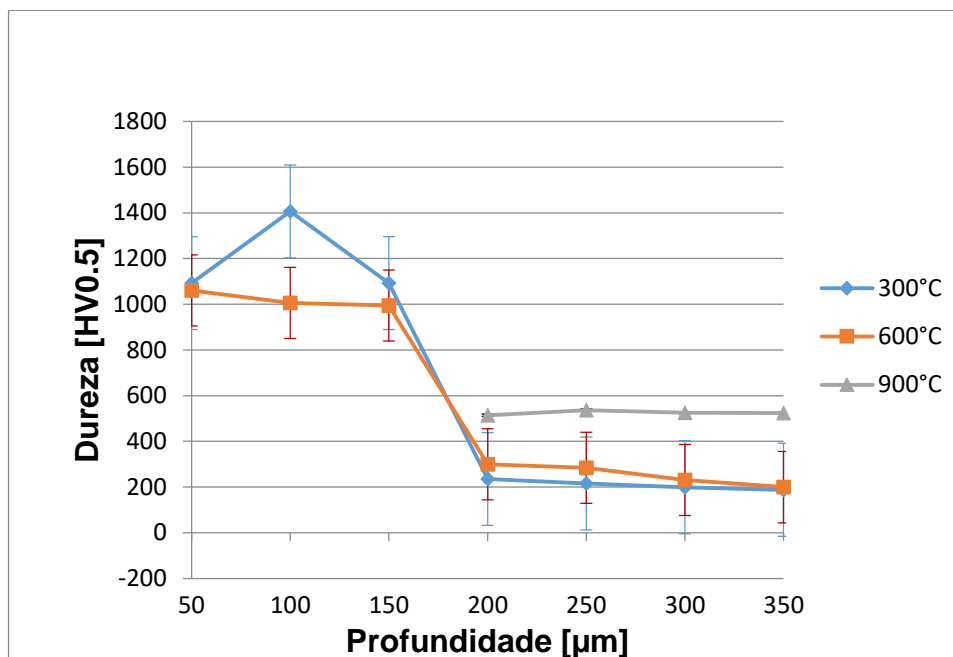
apresentando um melhor acabamento superficial. Na temperatura de 900°C o carbetto de cromo apresentou algumas falhas, como poros e trincas dispersas em todo o revestimento e início do descolamento. É possível ver o surgimento de trincas tendo início na extremidade do revestimento prolongando-se até o início do substrato, onde começa também o descolamento do revestimento na interface. O revestimento permaneceu com a mesma espessura, porém na extremidade da trinca percebe-se que gradativamente há uma diminuição do mesmo, podendo ocorrer com o aumento de poros próximos da superfície.

Os dois revestimentos de WC e CrC nas temperaturas de ciclagens de 300 e 600°C não variaram a espessura da camada revestida.

#### **4.4 Perfil de Microdureza**

Procedeu-se o ensaio de microdureza conforme descrito na metodologia, onde os resultados mostram o comportamento da dureza superficial do material após o ensaio de ciclagem térmica. Os gráficos a seguir estão divididos com a microdureza e seu desvio padrão para carbetto de tungstênio e carbetto de cromo, comparando-os nas temperaturas em que ocorreram os ensaios de ciclagens térmicas. Na Figura 35 tem-se a média das microdurezas no corpo de prova revestido por carbetto de tungstênio, onde as 3 endentações iniciais foram realizadas no revestimento e as demais no substrato.

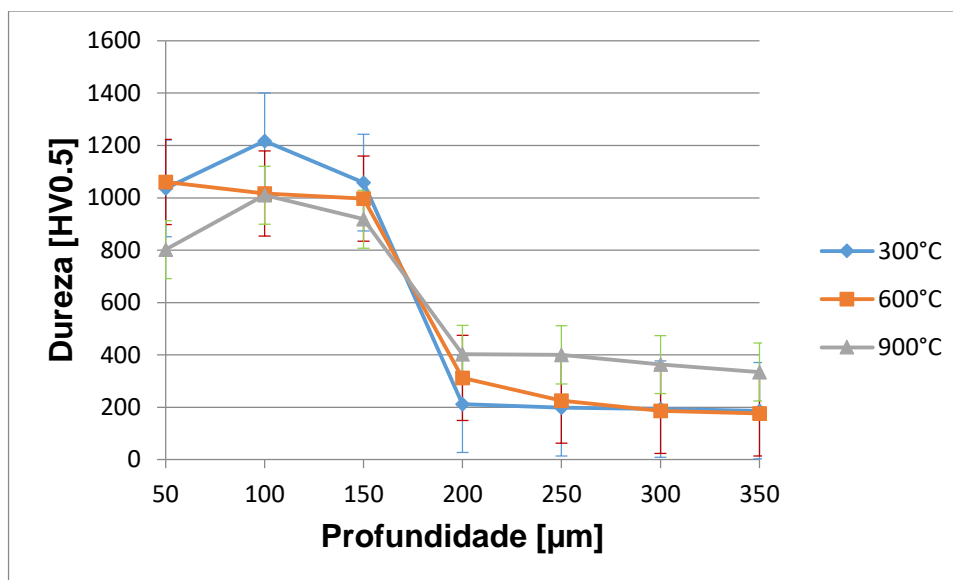
Figura 35 - Média das microdurezas do revestimento de Carbetto de Tungstênio



É possível visualizar valores maiores de dureza no revestimento para as amostras que sofreram ciclagens térmicas na temperatura de 300°C, diferente do substrato, em que para a temperatura de 600°C apresentou uma maior dureza. A microdureza na temperatura de 900°C foi medida somente no substrato devido o revestimento ter descolado e obteve valores na média de 500 HV os quais podem ter sido maiores que os outros por sofrer dilatações térmicas sem o revestimento.

A Figura 36 mostra os resultados da microdureza no carbetto de cromo, comparando as três temperaturas dos ciclos térmicos.

Figura 36 - Média das microdurezas do revestimento de Carbeto de Cromo



Para os corpos de prova de carbeto de cromo, a dureza no revestimento diminui conforme o aumento da intensidade dos ciclos térmicos, onde nas temperaturas de 300 e 600°C tiveram valores de dureza semelhantes próximos da superfície, provavelmente por terem reagido positivamente frente ao ensaio, e para a temperatura de 900°C houve uma redução significativa próximo da extremidade pelo aparecimento de porosidade nessa área. Contrariamente aconteceu nos resultados do substrato, quanto maior a temperatura dos ciclos, maior a dureza devido o aço 1020 ter propriedades diferentes de materiais cerâmicos.

#### 4.5 Dilatação térmica

Como visto na seção 2.2 da revisão bibliográfica, pode-se analisar as tensões térmicas a partir do módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica e diferença de temperatura. A Tabela 7 mostra as propriedades do aço 1020, WC e CrC.

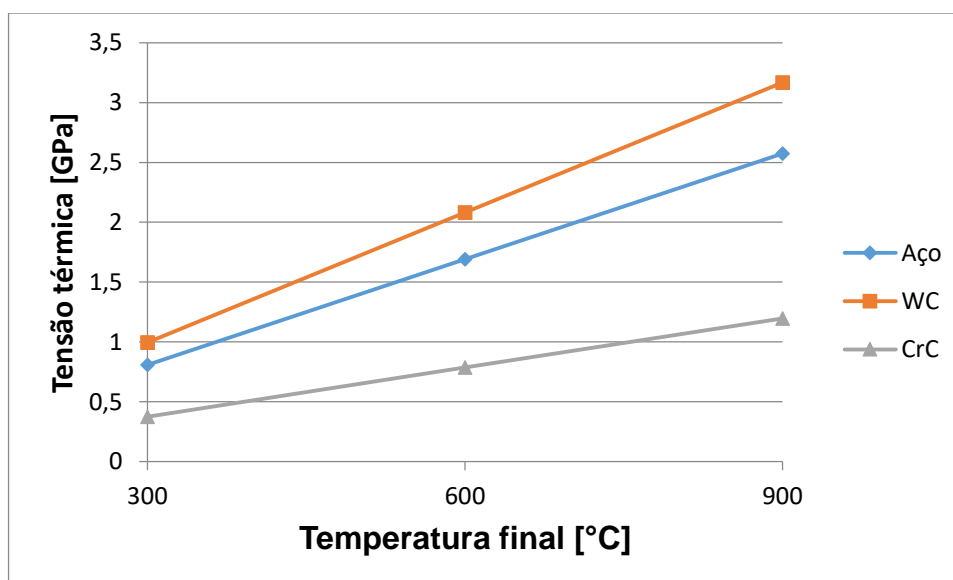
Tabela 7 - Grandezas do aço, WC e CrC

	Coefic. expansão térmica [ $10^{-6}$ ( $1/^\circ\text{C}$ )]	Módulo de elasticidade [GPa]
Aço 1020	14	210
WC	5,2	696
CrC	4,9	279

Fonte: Torres, 2009; Callister, 2007.

A partir da equação 1 foi possível determinar o gráfico da Figura 37, podendo comparar as tensões térmicas para cada material.

Figura 37 - Análise das tensões térmicas do aço, WC e CrC



Conforme a Figura 37, quanto maior é a temperatura solicitada para cada material, maior é a tensão térmica gerada e maior é o aumento das dilatações térmicas. É possível a visualização também da diferença de tensões entre o substrato e os revestimentos, quando em temperaturas maiores, onde conseqüentemente pode ocorrer a falha na interface pelas forças trativas e compressivas de cada um.

A partir dos ensaios realizados pode-se observar que o revestimento de carbetto de cromo apresentou um melhor desempenho, resistindo ao choque térmico em comparação ao carbetto de tungstênio, onde no sexto ciclo térmico na temperatura de 900°C o revestimento de WC saiu por completo do substrato,

enquanto que o revestimento de CrC continuou com a adesão intacta, porém com o início de aparecimentos de trincas superficiais. O aço 1020 possuiu boa resistência quando solicitado a ciclagens térmicas, quando esteve com toda a sua superfície aspergida por HVOF, evitando a descarbonetação e oxidação, devido ao fato de os revestimentos cerâmicos estudados terem baixa condutividade térmica e boa proteção mecânica (Almeida, 2005).

A resistência do revestimento de carbeto de cromo também se deve ao fato das partículas do pó possuírem diâmetro médio de 39,26  $\mu\text{m}$ , que com as altas velocidades e temperaturas do processo de deposição por HVOF as partículas fundem completamente ao se chocarem no substrato minimizando o surgimento de defeitos internos, como poros e inclusões (Lima e Trevisan, 2007).

A interface e o acabamento superficial foram analisados com o MEV, onde o revestimento de CrC permaneceu após todas as ciclagens térmicas com a mesma homogeneidade desde a aspersão por HVOF. O revestimento de WC com a ciclagem de 600°C perdeu certa homogeneidade, podendo prever maior sensibilidade após essa temperatura. A espessura da camada do revestimento se manteve com as mesmas medidas em todos os ensaios exceto, quando no descolamento a 900°C do WC, mostrando o quanto é eficiente à deposição via HVOF.

Após a análise de microdureza concluiu-se que quanto maior é a ciclagem térmica maior será a fragilidade no revestimento, devido o resultado apresentar menor dureza após cada ensaio. A dureza pode ter sido fundamental na boa resistência do revestimento de carbeto de cromo, pois possui um menor valor após o HVOF que o carbeto de tungstênio, podendo ter uma maior ductilidade com as contrações geradas e resistindo a mais ensaios de ciclagem térmica.

A análise das tensões térmicas a partir do coeficiente de expansão térmica mostrou que os revestimentos cerâmicos possuem baixo coeficiente de expansão térmica comparado ao aço 1020, o que geraria mais tensões a interface, tornando um revestimento não tão adequado quando usado com este tipo de aço para ambientes suscetíveis a choques térmicos.



## **5 CONCLUSÕES**

Portanto, conclui-se a partir dos resultados obtidos através dos ensaios experimentais, em que, buscava-se avaliar a resistência dos revestimentos de carbetos de tungstênio e carbetos de cromo depositados em aço 1020, expostos em situações de fadiga térmica utilizando o ensaio de ciclagem térmica, considera-se que os objetivos foram cumpridos uma vez que observou-se que o revestimento de carbetos de cromo apresentou maior resistência ao choque térmico, evitando o descolamento da interface do aço 1020. Desta forma, este revestimento pode ser útil em ambientes com baixa solicitação de tensões térmicas ou em componentes mecânicos em que o material possua menor resistência à fadiga térmica.

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

- Modificar os parâmetros de deposição do pó do revestimento de carbetos de cromo para elevar a resistência à fadiga térmica.
- Estudar um revestimento via HVOF para aumentar a vida útil do aço AISI H13 que é comumente utilizado em matrizes de conformação a quente e em ambientes suscetíveis a choques térmicos.
- Estudar a corrosão eletroquímica dos revestimentos de carbetos de tungstênio e carbetos de cromo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. S. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica. São José dos Campos: **INPE**, p. 175-177, 2005.

American Society for Testing and Materials (ASTM), “ASTM E1823, Standard Terminology Related to Fatigue and Fracture”, Pennsylvania, 2013.

BOCCANERA, Leonardo F. Resistência à erosão por cavitação de revestimentos depositados por soldagem e aspersão térmica. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Edition, **John Wiley & Sons**, New York, 2007.

CAPRA, André R. Desenvolvimento de intermetálicos Fe/Al através de aspersão térmica e tratamento posterior. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CARDOZO, Marcos A. Revestimento de NbAl, aspergido termicamente, contra corrosão sob tensão em aço austenítico. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CINTRA, G. B. et al. Espinelização in-situ e seu efeito na resistência ao choque térmico de concretos refratários. **Cerâmica**, v. 54, p. 287-295, 2008.

CLARO, Daniel Proença Goulão. Avaliação do comportamento ao choque térmico de refractários de 100% alumina: técnica de ultra-sons e resistência mecânica. **Tese (Doutorado em Engenharia Electromecânica)** – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

DA SILVA, M. N. P.; DA SILVA, M. N. P.; BARRIONUEVO, B. S.; FEITOSA, I. M.; DA SILVA, G. S. Revestimentos cerâmicos e suas aplicabilidades. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 2, n. 3, p. 87-97, 2015.

DA SILVA, Sinval Pedroso et al. Análise de falha da propagação de uma trinca pelo método de elementos finitos. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Santa Catarina, Joinville, 2017.

FERREIRA, Gustavo. Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma. **Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais)** - Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

FILHO, Marcos F. O. S. Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

GEHRKE, Gabriel Angelo. Revestimento de roscas helicoidais agrícolas a base de CRC depositado via HVOF posteriormente irradiadas com laser de Nd YAG e de CO<sub>2</sub>. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

GONÇALVES, Fernando A. Caracterização de Revestimento de Titânia Aplicado por Aspersão Térmica a Plasma em Liga Ti-6Al-4V para Aplicação em Implantes. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.

GUERRERO, G. E. et al. **Influência da geometria do bocal da pistola de aspersão térmica por arco elétrico na microestrutura de revestimentos do aço AWS 309 L**. In: Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais - Foz do Iguaçu, Paraná, 2006.

JÚNIOR, A. A. Avaliação experimental dos efeitos da fadiga térmica nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

KAEFER, Lígia F. Análise do comportamento eletroquímico de revestimentos de carbetos de tungstênio cimentados obtidos por aspersão térmica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LIMA, A. C. et al. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. **Soldagem Insp.**, v. 14, n. 2, p.140-150, 2009.

LIMA, C.; NIN, J.; GUILMANY, J. Evaluation of residual stresses of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats using the Modified Layer Removal Method (MLRM). **Surface and Coatings Technology**, v. 200, p. 5963-5972, 2006.

LIMA, Carlos C; TREVISAN, Roseana. **Aspersão térmica – fundamentos e aplicações**; 2ª ed. Editora Artliber. 2007.

LIMA, Petronio M. Caracterização de revestimentos de hidroxiapatita depositados por aspersão térmica a plasma sobre a liga Ti-13Nb-13Zr para aplicação em implantes dentários. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

LIMAR, C. R. C. Revestimentos para barreira térmica: evolução e perspectivas. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, p. 353-363, 2014.

MACEDO, Bruno Pereira Navarro; JUNO, Gallego. Simulação do processo de soldagem com arame tubular para deposição de revestimentos duros a base de diferentes carbonetos. **Anais do 15º Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica** (em CD-ROM), 6p., Curitiba, 2008.

MAGALHÃES, Frederico de Castro, et al. "Susceptibilidade a Fadiga Térmica de Matrizes Fechadas Para Forjamento a Quente." **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.11, n. 2, 2014.

MAGNANI, Marina. Estudo da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos metálico-cerâmicos aplicados na liga AA7050 mediante aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF). **Tese (Doutorado em Engenharia Química)** – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2008.

MARANHO, Ossimar. Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente. **Tese (Doutorado em Engenharia)** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARIANO, Carolina. Obtenção de revestimentos de nióbio depositados por aspersão térmica para proteção à corrosão marinha. **Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MARINHO, A. R. O. Avaliação da resistência ao choque térmico em refratários de alta alumina formados a partir de matérias-primas de alta reatividade. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2016.

MARSON, M. D. A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960. **Nova Economia**, v. 24, p. 685-710, 2014.

MOREIRA, D. A. **ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO E OPERAÇÕES**. 2017.

OLIVIO, Émillyn Ferreira Trevisani. Avaliação de ligas de Ni-Al utilizadas como revestimento estáveis a altas temperaturas depositadas por aspersão térmica à chama pó. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PANZIERA, Renato Camponogara. Aplicação do revestimento de wc depositado por aspersão térmica pelo método hvof para diminuir a abrasão do grão de arroz em máquinas agrícolas. **Trabalho de Conclusão do Curso** (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2016.

PAREDES, Ramón S.C. **Aspersão Térmica**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

PFINGSTAG, M. E. et al. Avaliação em relação à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 22, n. 3/4, 2010.

QUINTELA, M. A. et al. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. **Cerâmica**, v. 47, n. 304, 2001.

ROCHA, W. Da contabilidade de custos à gestão estratégica de custos. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 18, p. 7-7, 2007.

RODRIGUES, M. A et al. **Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de níquel - inconel 625 - depositada em forma de revestimento metálico**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

SILVA, C. C et al. Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com a Superliga à Base de Níquel Inconel 625. **Soldag. Insp.**, v. 17, n. 3, p. 251-263, 2012.

SOUZA, Vanessa Moura. Avaliação do atrito e do comportamento do desgaste de um aço ABNT H13 revestido com Cr3C2-25 (NiCr) e WC-10Co-4Cr através do processo de aspersão térmica oxidocombustível de alta velocidade (HVOF). **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SUCHARSKI, Gustavo B. Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama FS e HVOF com tratamento de shot peening. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TAKIMI, Antonio S. Obtenção de superligas NiCrAlY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF). **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TORRES, Camila dos Santos. Estudo da moagem de alta energia e sinterização de metal duro WC-Ni. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

UCHÔA, João Carlos Barleta. Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento. **Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)** – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

YBARRA, L. A. C. et al. Efeitos das características dos pós industriais de tungstênio e carboneto de tungstênio na microestrutura e dureza de metal duro para ferramentas de perfuração de rochas. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.3, n. 2, p. 10-25, 2008.