

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HARIET SUDBRACK
JEAN CARLOS RIBEIRO
OTÁVIO ROCHA RIBEIRO
RAFAEL SELVATICI DOS SANTOS

**ANÁLISE DA DUREZA DO CARBETO DE TUNGSTÊNIO INFLUENCIADO
PELA DISTÂNCIA DE APLICAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA**

ARACRUZ
2020

HARIET SUDBRACK
JEAN CARLOS RIBEIRO
OTÁVIO ROCHA RIBEIRO
RAFAEL SELVATICI DOS SANTOS

**ANÁLISE DA DUREZA DO CARBETO DE TUNGSTÊNIO INFLUENCIADO
PELA DISTÂNCIA DE APLICAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Esp. Patrik Borges do Nascimento
Leal

ARACRUZ
2020

**HARIET SUDBRACK
JEAN CARLOS RIBEIRO
OTÁVIO ROCHA RIBEIRO
RAFAEL SELVATICI DOS SANTOS**

**ANÁLISE DA DUREZA DO CARBETO DE TUNSTÊNIO INFLUENCIADO PELA
DISTÂNCIA DE APLICAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica, das Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ como requisito parcial a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 28 de janeiro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador Interno

Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado
Faculdades Integradas de Aracruz
Examinador Interno

RESUMO

O desgaste é um dos principais problemas encontrados na indústria e que levam a substituição de componentes mecânicos. Com o surgimento de técnicas que visam a preparação de superfícies com intuito de manipulá-las para suportar condições extremas de trabalho, tornando-as mais duras e menos suscetíveis ao desgaste, podemos citar a aspersão térmica, uma alternativa eficaz no método de aplicação de revestimentos como o carbeto de tungstênio, material extremamente duro. Possibilitando assim uma peça de maior dureza superficial, evitando o desgaste precoce. Este trabalho propõe avaliar a influência que a distância de aplicação no processo de aspersão térmica tem em relação ao comportamento da dureza do revestimento aplicado no substrato do metal de base. O substrato utilizado foi do aço ABNT SAE 1020, o revestimento metálico foi o carbeto de tungstênio (WC) e ambos os materiais foram fundidos através do método de aspersão térmica por flame spray. O ensaio de dureza Vickers foi realizado de acordo com as normas ASTM A1038 e ASTM E92-82. De acordo com os testes e resultados obtidos no trabalho, notou-se uma variação da dureza a medida que a distância de aplicação foi alterada. Para a distância de aplicação do processo de aspersão térmica a 100 mm, houve uma dureza média de 599,58 HV, valor esse de dureza ao qual foi possível notar uma queda à medida em que foi aumentada a distância de aplicação. Para distâncias de 200 mm e 300 mm, obtiveram-se médias de dureza de 589,55 HV e 572,04 HV respectivamente. Nesse caso há influência da dureza superficial do material aspergido quando o parâmetro da distância de aplicação se altera, sendo que para uma distância menor de aplicação do resvetimento, houve um parâmetro dureza maior.

Palavras-chave: Aspersão. Tungstênio. Dureza.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao nosso orientador Patrik Borges do Nascimento Leal, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

As empresas Metalmecânica Becker e Metalmecânica Imetame que muito nos ajudaram durante a elaboração desse trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de deposição das partículas	15
Figura 2 - Processo de aspersão térmica.....	16
Figura 3 - Secção transversal da estrutura de um revestimento	17
Figura 4 - História e crescimento da aspersão térmica	19
Figura 5 - Classificação dos processos de aspersão térmica.....	19
Figura 6 - Equipamento típico para aspersão térmica por combustão (esquemático).....	20
Figura 7 - Corte transversal de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama (esquemático).....	21
Figura 8 - Pistola utilizada pelo processo chama a pó	21
Figura 9 - Seção transversal de uma tocha para aspersão por chama (esquemática).....	22
Figura 10 - Esquema de uma tocha de aspersão oxicomustível de alta velocidade	23
Figura 11 - Esquema da aplicação aspersão térmica a arco elétrico	24
Figura 12 - Diferença entre os processos de limpeza	29
Figura 13 - Esquema de deposição de revestimento na superfície do substrato ..	31
Figura 14 - Preparação dos corpos de prova	37
Figura 15 - Material utilizado na aspersão térmica por Flame Spray	38
Figura 16 - Processo de acabamento superficial do corpo de prova.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do carbetto de tungstênio (% em massa).	27
Tabela 2 - Parâmetros da aspersão térmica	41
Tabela 3 - Resultados da dureza do ensaio 1 com distância de 100 mm	44
Tabela 4 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 1	44
Tabela 5 - Resultados da dureza do ensaio 2 com distância de 200 mm	45
Tabela 6 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 2	45
Tabela 7 - Média da dureza no ensaio 3 com 300 mm de distância	46
Tabela 8 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 3	47
Tabela 9 - Relação dos ensaios com as durezas médias	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da dureza no ensaio 1 com 100 mm de distância	44
Gráfico 2 - Média final de dureza dos corpos de prova do ensaio 1.....	45
Gráfico 3 - Variação da dureza no ensaio 2 com 200 mm de distância	46
Gráfico 4 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 2.....	46
Gráfico 5 - Variação da dureza no ensaio 3 com 300 mm de distância	47
Gráfico 6 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 3.....	47
Gráfico 7 - Comportamento da dureza em relação a distância de aplicação da aspersão.....	48

SIGLAS E ABREVIATURAS

°C - Grau (s) Celsius

π - Pi

AISI - American Iron and Steel Institute

Al₂O₃ - Óxido de Alumínio

ASP - Aspersão Térmica por Arco Elétrico

ASTM - American Society for Testing and Materials

AT - Aspersão Térmica

AWS - American Welding Society

B - Boro

C - Carbono

Co - Cobalto

Cr - Cromo

D - Diâmetro

DC - Corrente contínua

et. al. - Et alii (e outros)

etc. - Etecétera

F - Força

Fe - Ferro

FS - Flame Spray

g/min - Grama (s) por minuto

gf - Grama força

GPa - Giga Pascal

h - Profundidade da esfera

HV - Hardness Vickers

HVOF - High Velocity Oxygen Fuel

ISO - International Organization for Standardization

K - Kelvin

Kg/h - Quilograma (s) por hora

m/s - Metro (s) por segundo

mm - Milímetro (s)

Mpa - Mega Pascal

Ni - Níquel

PIB - Produto Interno Bruto

Q - Carga

Ra - Rugosidade

Si - Silício

t - Tempo

V - Volt (s)

W - Tungstênio

WC - Carbetto de tungstênio

μm - Micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 ASPERSÃO TÉRMICA	15
3.1 CONCEITO	15
3.2 HISTÓRICO	18
3.3 TIPOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	19
3.3.1 Combustão	20
3.3.1.1 Chama convencional	20
3.3.1.1.1 <i>Método por Flame Spray</i>	21
3.3.1.2 Oxidocombustível de Alta Velocidade (HVOF)	22
3.3.2 Aspersão Térmica por Arco Elétrico	24
3.4 PARÂMETROS DA ASPERSÃO TÉRMICA	25
3.6 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	27
3.6.1 Limpeza do substrato	28
3.6.1.1 Detergência	28
3.6.1.2 Limpeza Desengraxante	28
3.6.1.3 Decapagem	29
3.6.2 Rugosidade do substrato	30
3.6.3 Pré-aquecimento do substrato	30
3.6.4 Adesividade dos revestimentos	30
3.6.5 Porosidade dos revestimentos	32
3.6.6 Dureza do revestimento	32
3.6.6.1 Dureza Vickers	33
3.7 UTILIZAÇÃO E APLICAÇÕES	34

3.7.1 Recuperação Dimensional	35
3.7.2 Isolamento Térmico	35
3.7.3 Biocompatibilidade	35
4 METODOLOGIA	36
4.1 PESQUISA.....	36
4.2 TESTES	36
4.2.1 Método de aspersão por Flame Spray	36
4.2.2 Corpos de Prova	37
4.2.3 Material do revestimento	38
4.2.4 Preparação da Superfície	38
4.2.5 Aplicação do Revestimento	40
4.2.6 Acabamento Superficial	41
4.2.7 Ensaio de dureza	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 ENSAIO 1 – APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 100 MM DO SUBSTRATO	44
5.2 ENSAIO 2 - APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 200 MM DO SUBSTRATO	45
5.3 ENSAIO 3 - APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 300 MM DO SUBSTRATO	46
6 CONCLUSÃO	51
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	52
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que o custo anual com reparos, causados pelo desgaste abrasivo, é da ordem de 1% a 4% do PIB de uma nação industrializada. Esses gastos acontecem principalmente em áreas como agricultura, processamento de minerais e outras atividades relacionadas (NASCIMENTO, et al., 2016).

O desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, em face ao elevado custo de componentes de reposição aliado as vantagens de se recuperar peças as quais se elimina a substituição. Assim deseja-se elevar o desempenho dos sistemas mecânicos em uso, os quais são cada vez mais solicitados (PAREDES, 2012).

A aspersão térmica já era utilizada para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão e desgaste, e atualmente também é utilizado tanto na fabricação quanto na manutenção de diversos dispositivos, possibilitando maior resistência ao desgaste, melhor isolamento térmico e elétrico. (LIMA; TREVISAN, 2007).

Dentre os diversos métodos de aplicação por aspersão térmica existentes, destacamos o método por Flame Spray (FS), um processo simples, barato e eficaz na proteção e recuperação de peças no qual. Esse método foi utilizado neste trabalho, alterando-se a distância de aplicação do material aspergido. Através deste parâmetro é possível modificar as características do revestimento. Dentre as diversas características as quais a distância de aplicação influencia, a dureza é uma propriedade bastante relevante, pois ela está diretamente ligada à resistência mecânica do material. (SCHIEFLER, 2004).

Através da análise da dureza é possível mostrar a influência do parâmetro da distância na aplicação através de comparações entre diversos corpos de prova de mesmo material, aspergidos com carbeto de tungstênio em diferentes distâncias de aplicação no processo de aspersão térmica (SCHIEFLER, 2004), com isso, de maneira simples e abrangente, pretende-se ilustrar, por meio da literatura, o processo de utilização da aspersão térmica na proteção superficial de peças, mostrando os métodos desde a análise superficial até o procedimento finalizado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da distância da pistola da aspersão térmica utilizando a técnica de Flame Spray no aço ABNT SAE 1020.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar a aspersão térmica do metal sobre os corpos de prova com variação das distâncias;

Realizar ensaios nos corpos de prova através do ensaio de dureza para verificar a influência da variação da distância;

Analisar a correlação entre a variação da dureza superficial do material e a distância de aplicação.

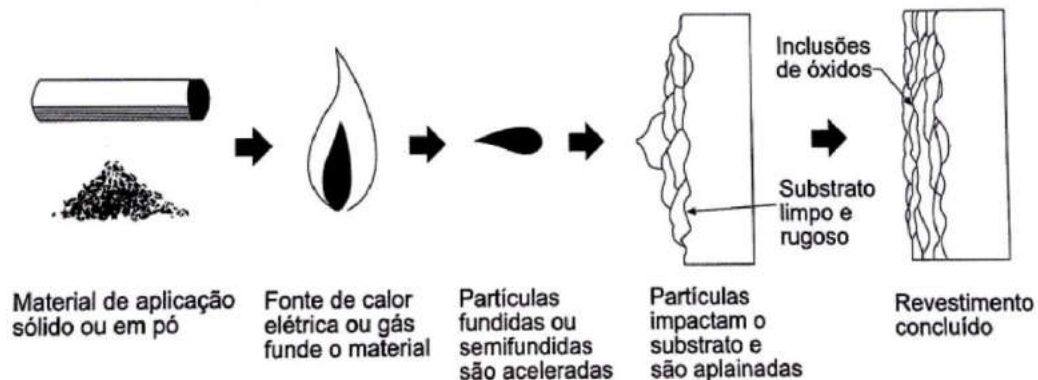
3 ASPERSÃO TÉRMICA

3.1 CONCEITO

A *American Welding Society* (AWS) define Aspersão Térmica, ou “Thermal Spray”, como sendo um grupo de processos nos quais se divide finamente materiais metálicos e não metálicos que são depositados em uma condição fundida ou semifundida, sobre um substrato preparado.

O revestimento é formado pela deposição sucessiva de camadas de partículas que se achatam e solidificam, resultando em estrutura lamelar. Quando ocorre o impacto das partículas aquecidas e aceleradas sobre o substrato (devido a um gás de arraste), estas se achatam formando pequenas lamelas. Ao incidirem sobre o substrato elas resfriam-se e se solidificam formando desta maneira o revestimento por aspersão térmica (LIMA; TREVISAN, 2007). A figura 1 descreve esse processo.

Figura 1 - Esquema de deposição das partículas

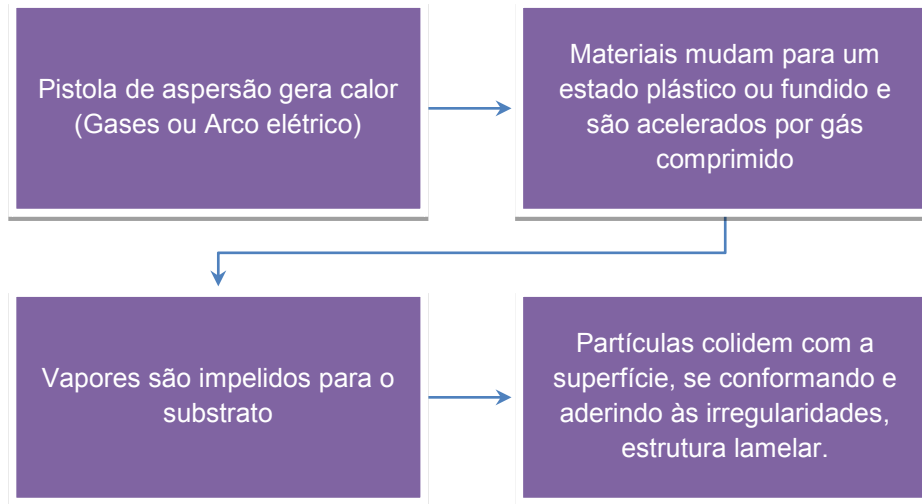


Fonte: Lima e Trevisan (2007)

A matéria prima utilizada no processo de aspersão térmica para obtenção do revestimento consiste de maneira geral de material metálico, na forma de pó, vareta ou arame. Esse material é fundido através de uma fonte de calor que pode ser de origem química (combustão) ou elétrica (arco elétrico). O material é impulsionado por ar comprimido ou outros tipos de gases. A aderência ao substrato se dá por mecanismo de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e da velocidade imposta às

partículas (MARQUES, 2003). Um resumo do processo do processo de aspersão pode ser verificado na figura 2.

Figura 2 - Processo de aspersão térmica



Fonte: Autor

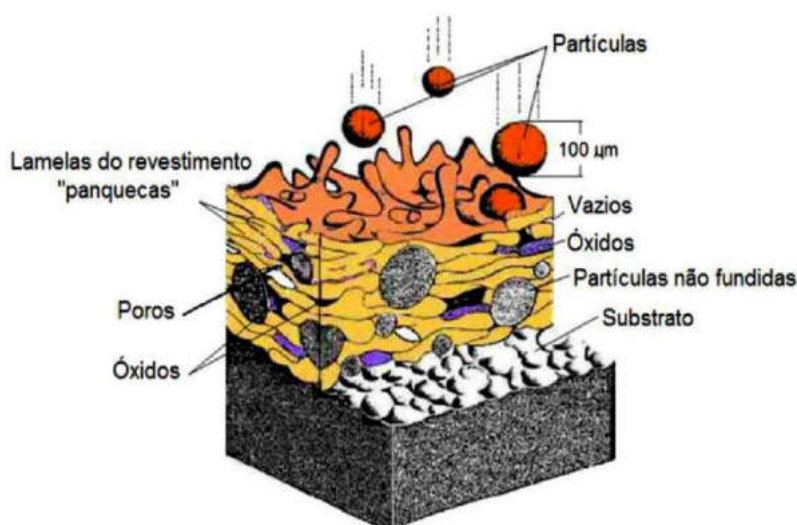
Os revestimentos aplicados pela aspersão térmica têm como principal objetivo a proteção de substratos contra desgaste abrasivo, desgaste erosivo, contra corrosão, fadiga superficial e até mesmo como alternativa de recomposição dimensional de componentes que sofreram algum processo de desgaste ou degradação, garantindo assim, a integridade dimensional do componente e adicionando a este uma melhoria na região aspergida, evitando a necessidade cada vez mais frequente do consumo de recursos naturais ou de energia na fabricação de novos componentes (MARANHO, 2006).

A deposição por aspersão térmica pode ser realizada na maioria dos metais e suas ligas em materiais cerâmicos, óxidos, vidros, madeira, entre outros, onde o material aspergido pode ser fornecido na forma de vareta, arame ou pó. A estrutura e a química do depósito aspergido são diferentes do material no seu estado original. Essas diferenças são devidas à natureza do revestimento à reação com gases durante o processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido, obtendo desta maneira metais aspergidos termicamente (MARIANO, 2016).

Os revestimentos aspergidos apresentam como principal característica uma

morfologia lamelar com presença de partículas fundidas ou semifundidas, poros, inclusões que podem alterar as propriedades dos revestimentos (figura 3). Os poros formam-se durante a sobreposição das lamelas, enquanto que os óxidos são provenientes da interação química entre as partículas e os gases utilizados na pulverização. Essa soma de características faz com que, de maneira geral, a superfície aspergida se torne mais dura que o metal ao qual está sobreposta (SANTOS, 2008).

Figura 3 - Secção transversal da estrutura de um revestimento



Fonte: Krepski (1993)

Adotando com cautela o revestimento por aspersão térmica de acordo com os métodos determinados acarreta em êxito, já que seja qual for o deslize, pode levar a efeitos não satisfatórios. Portanto, é muito importante a fase de preparação das superfícies, onde determinará se o material de base terá a aceitação essencial para com todo o processo de aspersão (MENEZES, 2007).

Várias causas podem influenciar a ligação entre o revestimento e o substrato, são elas o tipo do material de revestimento, o estado do material base, rugosidade, limpeza e ainda a temperatura do local a ser revestido. Como declarado antes, é essencial analisar as alterações geradas pelo ambiente ou pela circunstância de trabalho na superfície, com a finalidade de definir o material para o processo de proteção e o meio de realização. (AWS, 2017).

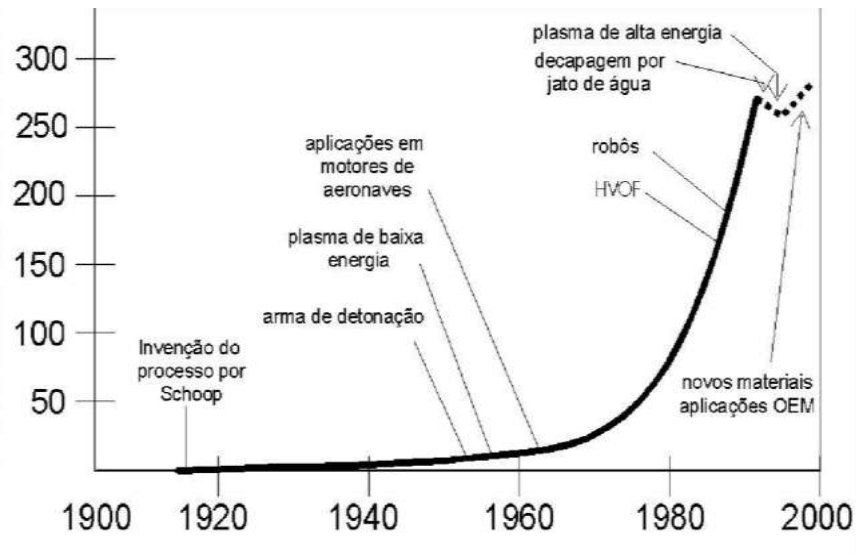
3.2 HISTÓRICO

Historicamente os revestimentos metálicos já eram utilizados em caráter decorativos, onde o ouro era o principal metal utilizado devido ao seu brilho, cor e resistência mecânica. A primeira aplicação industrial da aspensão térmica foi desenvolvida a partir de um processo de combustão (oxigênio-combustível) por uma equipe de pesquisadores liderados pelo Dr. Max Ulrich Schoop de Zurique na Suíça, baseando-se inicialmente em um processo utilizado na idade média, no qual projetavam partículas de metal fundido com jato de vapor ou ar comprimido. Utilizaram o calor gerado por combustão de uma chama a gás (LIMA; TREVISAN, 2007) para fundir um arame metálico (a base de zinco e estanho). Em 1912 veio então a segunda patente, utilizando a energia elétrica como fonte para produzir calor (COUTO, 2006).

Em meados de 1920 a aspensão térmica foi utilizada como proteção contra corrosão, tendo o zinco como metal aspergido. Assim sucessivamente ao longo dos anos foram sendo desenvolvidas novas técnicas para aplicação da aspensão térmica. Em 1940 utilizou-se numa pistola o arco voltaico como gerador de calor. Em 1960 foi desenvolvido um novo processo através do arco plasma e mais tarde a deposição de pó pela detonação. Já o processo de aspensão térmica a chama utilizando uma pistola hipersônica, foi desenvolvida em 1980, onde foi possível transferir partículas aspergidas com elevada velocidade (LIMA; TREVISAN, 2007).

Foi a partir da década de 90 que houve uma evolução dos equipamentos e materiais aplicados à aspensão térmica, proporcionando um aumento significativo na velocidade de deposição das partículas, denominado de Aspensão Térmica Oxi-Combustível de Alta Velocidade ou "HVOF". Com a evolução dos métodos obteve-se um ganho considerável na redução da contaminação do material aspergido, redução do risco de oxidação e do aparecimento de poros (LIMA; TREVISAN, 2007). A figura 4 mostra a evolução do processo do processo de aspensão térmica em diversos ambientes e aplicações.

Figura 4 - História e crescimento da aspersão térmica

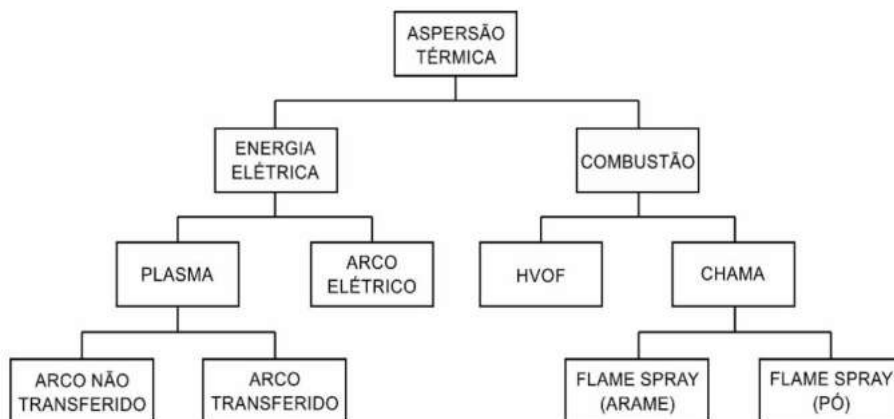


Fonte: Thorpe (1998)

3.3 TIPOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

A camada protetora utilizada para preservar a peça pode ser empregada utilizando vários tipos de processos, estes que se diferenciam pela densidade do depósito, estrutura química, velocidade das partículas e da temperatura em que são aplicados. Atualmente os processos de aspersão térmica são classificados em função dos métodos de geração de energia (calor). As fontes mais utilizadas são: Energia de combustão de gases e energia elétrica, conforme apresentado na figura 5 (POLLNOW, Aspersão Térmica).

Figura 5 - Classificação dos processos de aspersão térmica



Fonte: Paredes (2009)

3.3.1 Combustão

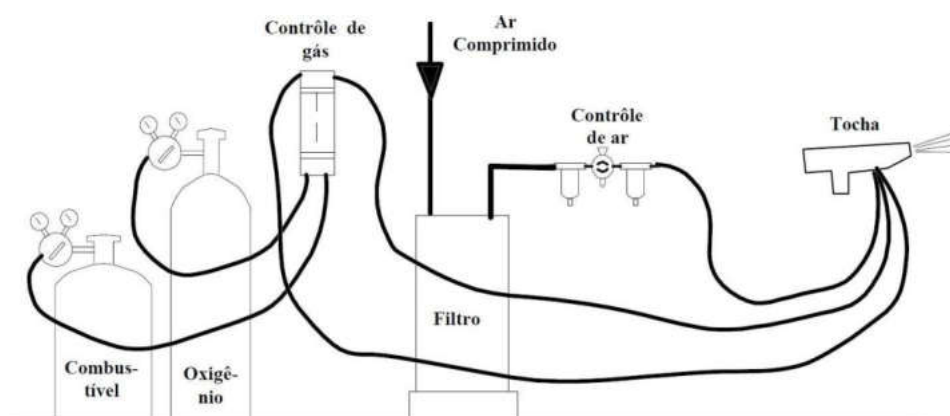
Esse processo utiliza o calor gerado pela combustão de uma mistura de gases combustíveis para fundir o material a ser depositado. Os gases consumidos são o oxigênio combinado com outro gás, usualmente o acetileno, por ter um menor custo e uma maior temperatura de aplicação, mas também podem ser empregados o propano, hidrogênio ou metil-acetileno-propadieno (NOVICKI, 2008).

Com relação aos materiais para o revestimento no processo de combustão, eles são manuseados sob a forma de pó ou arame e podem ser compostos de metais ou ligas metálicas, materiais cerâmicos e alguns plásticos (MARIANO, 2008).

3.3.1.1 Chama convencional

Neste processo a fonte de calor é obtida através da energia química de um gás combustível (geralmente o acetileno) junto com o oxigênio. As temperaturas podem oscilar de 2640 a 3100 ° C (MARQUES, 2003). A figura 6 apresenta uma unidade de aspersão térmica típica.

Figura 6 - Equipamento típico para aspersão térmica por combustão (esquemático)



Fonte: Marques (2003)

Os gases são controlados e levados até o bico da pistola, onde produzem a combustão e, por meio dessa combustão, se funde o material. É por meio de um jato de ar comprimido, filtrado e controlado, ligado à pistola, que as partículas

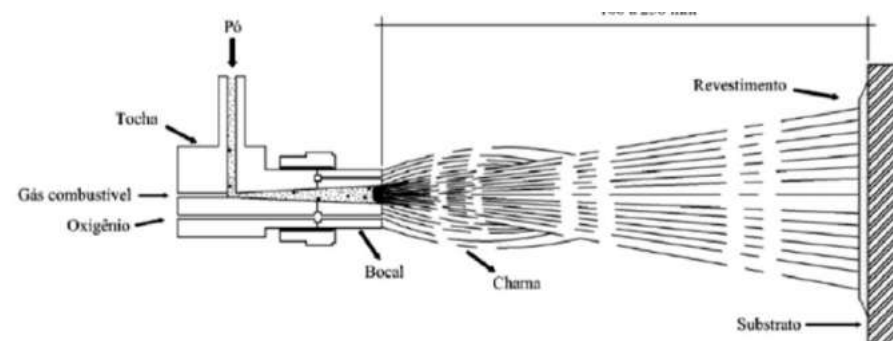
fundidas alcançam a superfície do metal (NOVICKI, 2008).

3.3.1.1.1 Método por Flame Spray

Quando o material a ser aspergido se encontra na forma de pó, é chamado de aspersão por Flame Spray por pó. Nesse método, o material de revestimento é alimentado de forma radial na tocha de aspersão, através da ação da gravidade, sendo a taxa de alimentação do pó variando de 50 a 150g/min e posteriormente são aspergidas na peça pelo jato de ar comprimido. (PAREDES, 2009).

O calor da chama é utilizado tanto para fundir o material base, quanto para direcioná-lo ao substrato. A relação da mistura oxigênio-combustível é de 1:1 em volume. A taxa do fluxo de gás de transporte vai de 3 a 5 litros/min (LIMA; TREVISAN, 2007). Na figura 7 e figura 8, mostra as principais características da pistola alimentada por pó.

Figura 7 - Corte transversal de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama (esquemático)



Fonte: Adaptado Rijeza

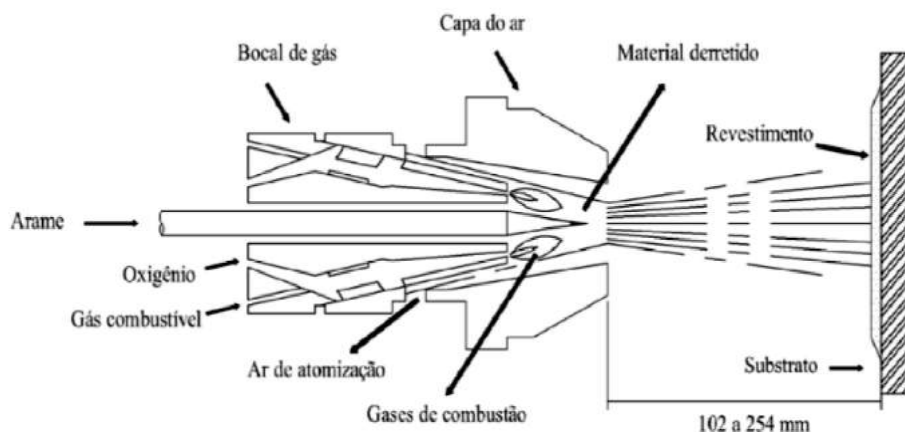
Figura 8 - Pistola utilizada pelo processo chama a pó



Fonte: Autor

No caso da aspersão térmica utilizando método de Flame Spray por arame, o mesmo é conduzido até um bocal localizado na pistola com o auxílio de um motor elétrico, pneumático ou uma turbina movida geralmente a ar comprimido. A pistola é alimentada de forma contínua e a atomização do metal fundido e sua aceleração até o substrato são realizadas por um jato de ar comprimido. Dessa forma, são obtidas maiores velocidades de transferência além de uma melhor qualidade final do revestimento (LIMA; TREVISAN, 2001). A figura 9 mostra a pistola alimentada por arame, no qual é possível ver pequenas diferenças.

Figura 9 - Seção transversal de uma tocha para aspersão por chama (esquemática)



Fonte: Adaptado Rijeza

3.3.1.2 Oxicombustível de Alta Velocidade (HVOF)

A aspersão térmica por oxicombustível de alta velocidade ou *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) é uma técnica de deposição por pulverização de pós que permite, a um custo razoável, melhorar as características da superfície de um material e prolongar a sua vida, mesmo em ambientes de trabalho particularmente corrosivos, difíceis e perigosos. Geralmente, este resultado é obtido, sem interferir com as características mecânicas e estruturais do substrato e, assim, sem a necessidade de tratamento adicional. O revestimento final é caracterizado principalmente por uma elevada densidade, força de ligação elevada, o que garante um aumento do grau de ancoragem do revestimento, por uma elevada dureza e pouca porosidade (< 1%) baixo nível de rugosidade ($R_a < 2 \mu\text{m}$) além de elevada resistência ao desgaste. Estas características variam em função do tipo

de material e parâmetros de deposição. A elevada velocidade também permite manter baixas temperaturas de pré-aquecimento do substrato a ser revestido. (MARIANO, 2008).

O processo faz uso de uma mistura, onde o gás combustível é queimado com o oxigênio a alta pressão, gerando um jato de exaustão de alta velocidade. Os combustíveis mais utilizados são: o propano, o propileno, o metil-acetileno-propadieno ou o hidrogênio. Os combustíveis são misturados nas seguintes proporções: oxigênio - acetileno (1,5: 1 em volume) alcança 3170°C e oxigênio-propileno (4:1 em volume) alcança 2900°C (LIMA; TREVISAN, 2007).

O pó normalmente repleto de partículas parcialmente fundidas, segundo (COUTO, 2006) podem atingir velocidades de até 1200 m/s, ou seja, três vezes mais que a velocidade do som. O tamanho das partículas do pó utilizado no processo HVOF usualmente é de 5 a 45 μm . A taxa de alimentação de pós pode variar de 20 a 80 g/min. Este método apresenta boa qualidade do revestimento e tensões residuais menores e baixa formação de poros (CARVALHO, 2007). Na figura 10 mostra o esquema da tocha HVOF.

Figura 10 - Esquema de uma tocha de aspersão oxicombustível de alta velocidade



Fonte: Lima e Trevisan (2001)

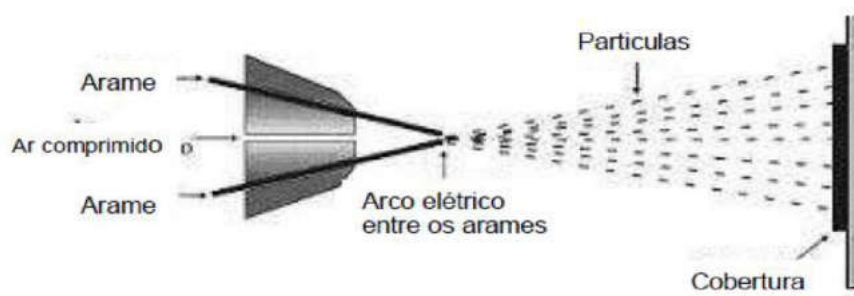
Através da figura 6 pode-se compreender o funcionamento do sistema, no qual ocorre a expansão dos gases e logo após, temos a entrada do pó no sistema, onde é aquecido e conduzido em alta velocidade para a superfície da peça. Devido às altas temperaturas exercidas no processo, o sistema necessita de um resfriamento a água. Por colidirem com a base em altas velocidades, as partículas aspergidas não necessitam estar completamente fundidas para que se consiga um revestimento adequado (PAREDES, 2012).

3.3.2 Aspersão Térmica por Arco Elétrico

Processo que utiliza o arco elétrico como fonte de calor para fundir o material (na forma de arame) a ser depositado no substrato. O arco elétrico é obtido por um diferencial de potencial no bico de uma pistola aonde chegam dois arames do material de deposição. Um forte jato de ar comprimido é dirigido ao arco elétrico, na região onde se funde o material, atomizando-o e projetando-o contra o substrato (PAREDES, 2012).

O acionamento do mecanismo de alimentação contínua do arame pode ser feito por meio de uma pequena turbina movida a ar comprimido ou por um motor elétrico. A velocidade de projeção de partículas atinge até 250 m/s. Na unidade de controle é ajustada a alimentação dos arames, o retificador de corrente contínua trabalha entre 18 e 40 V e permite operação com vários materiais, sejam puros ou ligados (sólidos e tubulares). A abertura do arco e o tamanho das partículas aumentam com a elevação da intensidade de tensão elétrica. Esta deve ser mantida nos níveis mais baixos para manter a estabilidade do arco o que deveria resultar em camadas mais densas e uniformes. As temperaturas geradas no arco elétrico são da ordem de 4000 a 6000 °C, onde quaisquer dos materiais empregados neste processo são fundidos (MARQUES, 2003). A figura 11 mostra de uma forma esquemática o processo de aspersão por arco elétrico:

Figura 11 - Esquema da aplicação aspersão térmica a arco elétrico



Fonte: Adaptado Rijeza

Características do processo de aspersão a arco elétrico:

- Apresenta normalmente maior taxa de deposição que os demais processos (até 55 kg/h);

- O aquecimento do substrato é menor que na aspersão por chama;
- Os controles da taxa de aplicação são: A corrente da fonte de energia, e a taxa de alimentação de arame;
- Não há fonte externa de calor, tais como nos processos de chama a gás e plasma induzida eletricamente;
- Resistência adesiva acima de 69 MPa pode ser conseguida para alguns materiais.

3.4 PARÂMETROS DA ASPERSÃO TÉRMICA

A escolha correta do processo de aspersão e, principalmente, dos seus respectivos parâmetros (velocidade da partícula, distância da pulverização, tipo de gás utilizado, etc.) influenciam diretamente nas características da microestrutura da peça, como por exemplo, a formação de rachaduras, poros e óxidos. Essas características irão influenciar diretamente na espessura, resistência de ligação e dureza da peça. Portanto, uma boa avaliação e escolha dos processos e parâmetros são imprescindíveis para obtenção de bons revestimentos e, conseqüentemente, peças com maior vida útil (SCHIEFLER, 2004).

O processo de Aspersão Térmica por Flame Spray possui alguns parâmetros segundo Pawlowski (2008):

- Distância de aplicação entre a tocha e o substrato pode variar entre 100 a 250 mm;
- O ar como atmosfera de aplicação;
- Ângulo da pistola, tendo como melhor resultado entre 75° a 90°;
- Espessura do material depositado varia entre 0,1 a 2,5 mm;
- Dureza ultrapassa 500 HV.

Também deve ser considerados a pressão e o fluxo do ar comprimido utilizado para levar as partículas até o substrato e fornecer a turbina pressão suficiente para alimentar, com arame, o bico da pistola. Neste mesmo sentido, o fluxo de gás, combustível e oxigênio, deve estar sempre regulado, a fim de formar e manter uma chama neutra, permitindo a fusão do material (PAREDES, 2012).

A qualidade dos revestimentos aspergidos está ligada diretamente ao controle da distância entre a pistola e o substrato, inclusive no processo de aspersão por flame spray. A distância influencia, sobretudo nos fatores como a perda de energia cinética durante o transporte das partículas, a oxidação em movimento e a temperatura das partículas no momento do impacto com o substrato. O fato é que, quanto maior a distância da pistola ao substrato, maior o tempo que as partículas ficarão expostas à atmosfera e menor é a força de impacto das mesmas no contato com o substrato (PAREDES, 2012).

3.5 PÓS METÁLICOS

O metal duro é um produto da metalurgia do pó resultante da sinterização, ou seja, do aquecimento em alta temperatura, de briquetes obtidos a partir de uma mistura de pós metálicos, nos quais o tungstênio predomina, sob a forma de carboneto de tungstênio (WC), com teores que ultrapassam os 50%, e com teores menores, pode estar contido na mistura o níquel, o cobalto, os carbeto de tântalo e titânio ou carbonetos de outros metais. O carbeto de tungstênio, por sua vez, é aplicado, exclusivamente, na fabricação do chamado metal duro. (CARBÓ, 2008).

Apesar de o pó metálico conter outras ligas que influenciam na propriedade final da liga, o pó de carbeto de tungstênio possui esse nome por conter em sua composição química o carboneto de tungstênio em maiores proporções. O carbeto de tungstênio apresenta elevada temperatura de fusão (2800°C), elevado módulo de elasticidade (699 GPa), baixo coeficiente de expansão térmica ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) e elevada dureza (superior a 600 HV), que se mantém relativamente estável até cerca de 1000°C (PAREDES, 2012). Em decorrência da estabilidade térmica e dos elevados valores de propriedades mecânicas, o WC é largamente utilizado na produção de materiais compósitos para aplicações que necessitam elevada resistência ao desgaste, como ferramentas de usinagem e de corte, matrizes de conformação mecânica, rolamentos, selos mecânicos, contatos elétricos e recobrimentos resistentes ao desgaste (MARQUES, 2003).

Segundo dados do fabricante do material, para a aplicação do revestimento, o tungstênio foi o principal elemento identificado no pó de carbeto, com cerca de

52%. Os demais elementos detectados foram o níquel, cobalto, cromo, ferro, silício, traços de boro e carbono. A composição química do carbeto de tungstênio é detalhada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do carbeto de tungstênio (% em massa).

WC	Ni	Co	Cr	Fe	Si	B	C
52,80	28,28	7,20	6,72	1,68	1,56	1,40	0,36

Fonte: Metco (2019)

O pó que surge da mistura do carboneto de tungstênio com os outros componentes da mistura pode ser caracterizado através de dois parâmetros principais, como a quantidade dos demais elementos na liga e a granulometria. Estes parâmetros vão influenciar nas propriedades mecânicas da camada aspergida. O tamanho alto do grão de carboneto de tungstênio e uma baixa porcentagem importante dos outros elementos conferirá uma resistência ao choque elevada para a peça. Por outro lado, um tamanho fino do grão de carboneto de tungstênio e uma baixa porcentagem dos outros elementos da mistura aumentarão a dureza e a resistência ao desgaste da peça. Cada aplicação deve ser analisada para escolher o grau de carboneto de tungstênio que oferecerá a melhor resistência ao desgaste, e ao mesmo tempo tendo uma resistência ao choque aceitável (MARQUES, 2003).

3.6 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Visando aperfeiçoar o processo de aspersão térmica, é fundamental a preparação da superfície a ser aspergida antes da aplicação do revestimento. A preparação do substrato tem por objetivo receber o revestimento de maneira eficaz, mantendo a melhor aderência possível entre o material aplicado e superfície do metal base. Um revestimento aplicado sem a prévia preparação da superfície não irá conseguir exercer suas funções destinadas. Revestimentos aplicados no processo de aspersão térmica são constantemente desprendidos do substrato quando não se executa de maneira apropriada uma preparação do substrato (VERSÁTIL SERVICES, 2014).

É considerada a etapa mais crítica de todo o processo de aspersão térmica. O tipo de material de revestimento e do metal base a serem utilizados no processo deve ser escolhido adequadamente, pois são os elementos fundamentais que ditam a qualidade do revestimento e definem o método a ser utilizado na operação (MARQUES, 2003). O processo de preparação da superfície é dividido em três estágios:

3.6.1 Limpeza do substrato

Os processos utilizados para a limpeza são divididos em duas categorias, a limpeza química e a limpeza mecânica, podendo ser empregadas em conjunto ou isoladamente. Por limpeza química pode-se citar a detergência, o desengraxamento e a decapagem ácida. O processo de limpeza mecânica é o mais utilizado na aspersão térmica, que consiste na ação mecânica de materiais abrasivos a fim de remover óxidos ou sujidades (óleos e graxas, em geral) da superfície metálica, dando como resultado uma superfície limpa. A limpeza mecânica pode ser realizada por processos manuais ou mecanizada (GENTIL, 2007).

3.6.1.1 Detergência

A limpeza por detergência, também conhecida como limpeza alcalina, varia de acordo com o tipo de trabalho, os chamados alcalinos pesados (a base de carbonatos de sódio, por exemplo) são utilizados para limpeza de aço, quando a sujidade é grande e de natureza severa (GENTIL, 2007).

3.6.1.2 Limpeza Desengraxante

A aplicação da limpeza por desengraxamento pode ser realizada por: vapor, jato de solvente em câmara de vapor e imersão em solvente a quente e vapor. Essa possibilita remover materiais prejudiciais para o processo, como abrasivos e lubrificantes remanescentes, graxas e óleos oriundos de armazenamento ou de operações anteriores (GENTIL, 2007)

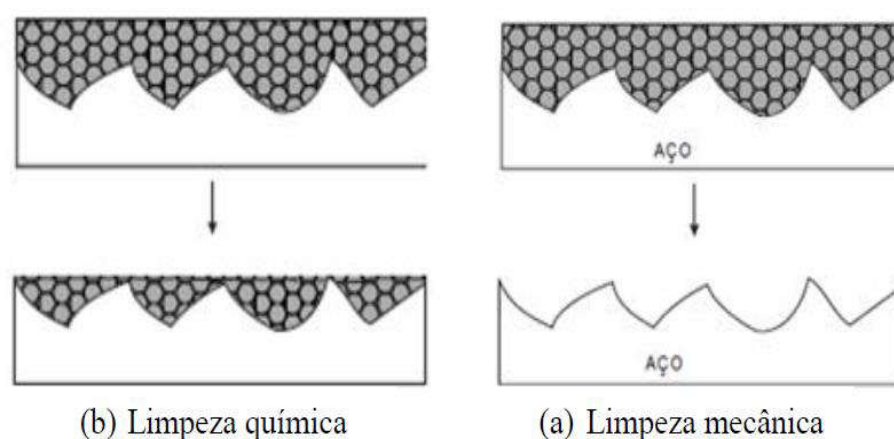
3.6.1.3 Decapagem

Após a aplicação da limpeza química e desengraxante, utiliza-se comumente o jateamento abrasivo para finalizar o processo. Todos abrasivos usualmente empregados são considerados satisfatórios para realizar a limpeza necessária, alguns possibilitando mais e outros menos aderência da camada protetora no substrato. Removem crostas de óxidos e ferrugem da superfície da peça (MARIANO, 2008).

A forma, a densidade e a granulometria do abrasivo, são características que devem ser consideradas (AWS, 2017). Abrasivos que possuem forma angular podem aderir em substratos macios, como alumínio, porém são os mais recomendados por seu poder de limpeza e asperização. Abrasivos de formas esféricas, não são recomendados para obter rugosidades, pois resultaria numa superfície martelada (aplainada) característica de um tratamento por “peening”, prejudicando a aderência do revestimento (MARANHÃO, 2006).

Independente do processo usado recomenda-se após a limpeza mecânica que a superfície deva ser limpa com aspirador, ar comprimido ou escova, para eliminação de resíduos (AWS, 2017). A figura 12, mostra de forma clara a vantagem que o processo de limpeza mecânica tem em relação à limpeza química, pois praticamente remove todos os resíduos que por ventura ficariam depositados nas protuberâncias do material.

Figura 12 - Diferença entre os processos de limpeza



3.6.2 Rugosidade do substrato

Após a limpeza, a superfície deve apresentar uma rugosidade para que ocorra a adesão satisfatória do material aspergido ao substrato. Tornando ainda mais importante quando se trabalha com o substrato na temperatura ambiente. Pode ser colocada como a última etapa antes da aplicação do revestimento. Deve-se ressaltar que a texturização é de extrema importância, sendo um dos principais requisitos para uma boa aderência (PAREDES, 2012).

Utiliza-se o jateamento abrasivo, lixamento ou a usinagem para que a peça alcance a rugosidade solicitada no processo. O jateamento abrasivo é o meio mais utilizado, em razão de, juntamente com a remoção de impurezas, possibilitar o aparecimento da rugosidade superficial essencial para a aplicação e aderência do revestimento (NOVICKI, 2008). Os métodos para obtenção de rugosidade para o processo de aspersão térmica são padronizados pelas normas ABNT NBR ISO 4287 e a ISO 8501.

3.6.3 Pré-aquecimento do substrato

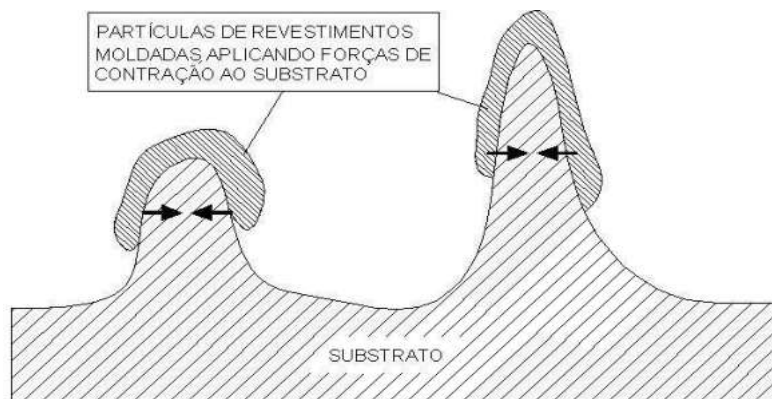
Experimentos mostraram que a prática de pré-aquecer o substrato, melhora na adesão do revestimento, pois retardam o resfriamento das partículas para melhorar o contato substrato/partículas e promover a ligação térmica. Cuidados devem ser tomados para não favorecer o aparecimento de camadas espessas de óxidos. Na prática, sugere-se que as superfícies sejam aquecidas a temperaturas entre 80 e 220°. C (MELLALI, 2007).

3.6.4 Adesividade dos revestimentos

Quando se fala em revestimentos, um dos maiores questionamentos é quanto a sua aderência ao substrato. A resistência adesiva (adesão) e coesiva (coesão) pode ser considerada a mais importante propriedade que um revestimento deve apresentar, sendo esses os requisitos primordiais para um bom desempenho. Não adianta ter um revestimento livre de poros, óxidos e uma camada ideal se a mesma não tiver a aderência necessária para o desempenho do componente que recebeu o revestimento (NOVICKI, 2008). A resistência mecânica de um

revestimento submete-se a aderência entre a camada e o substrato e da coerência das partículas do revestimento. As camadas do revestimento se juntam à superfície do substrato através da solidificação das partículas que atribuem uma força de contração ao líquido, como se pode ver na figura 13 (PAREDES, 2012).

Figura 13 - Esquema de deposição de revestimento na superfície do substrato



Fonte: Paredes (2009)

A aderência é uma mistura de três mecanismos, que de acordo com a natureza das forças, são considerados ao analisar a aderência do revestimento, e atuam junto ou separadamente, são eles: mecânico, químico-metalúrgico e físico. As partículas são aquecidas e aceleradas na superfície, quando entram em contato, no impacto, elas se achatam e resfriam rapidamente fazendo com que contornem mecanicamente a superfície do substrato e as irregularidades (LIMA; TREVISAN, 2007).

A aderência químico-metalúrgica pode ocorrer por causa da microssoldagem, regiões de contato entre as camadas, dependendo do tipo de material e da transferência de calor ao substrato, podendo haver fusão localizada ou difusão atômica com formação de soluções sólidas (PAREDES, 2012).

O mecanismo de aderência físico é responsável pela ligação entre os átomos das camadas e a superfície do substrato e ocorre através das forças de Van der Waals, que por sua vez, produzem ligações fracas tornando essencial que as superfícies estejam limpas e que o contato seja bem próximo (NOVICKI, 2008).

De modo geral, a resistência do revestimento será maior se a área de ligação entre os elementos também for maior. Através da diminuição da camada de óxido

ou pela inserção de componentes desoxidantes no material a ser aspergido, eleva-se então, a superfície de contato (PAREDES, 2012).

3.6.5 Porosidade dos revestimentos

A porosidade fundamenta-se em cavidades com poros conectados, por meio do processo de aspersão térmica consegue-se revestir uma peça com porosidade alterável, que normalmente depende destes processos. A condutividade elétrica e térmica é diretamente afetada e ainda reduz a aderência à superfície e a colisão das camadas (PAREDES, 2012).

Os revestimentos obtidos por aspersão térmica são formados por superposição de partículas achatadas, por isso apresentam um alto grau de porosidade. (MCPHERSON, 1981) em seus estudos mostrou que os poros possuem tamanhos de 10 a 100 μm .

A porosidade é inerente a todos os processos de aspersão térmica. As principais fontes responsáveis pelo surgimento de poros são:

- Ângulo de aspersão;
- Partículas sólidas não fundidas.

O efeito da relação da mistura oxigênio-combustível e sua vazão no processo de Aspersão Térmica por Flame Spray sobre a porosidade do revestimento são fatores diretamente ligados. Para obter uma menor porosidade na superfície da camada aspergida, a taxa de vazão do fluxo de gás varia de 2,5 a 4 litros/min e relação da mistura de oxigênio e acetileno deve ser próxima de 1. Ou seja, quanto mais próximo a um a razão oxigênio/acetileno menor será a porosidade. A granulometria do material também é um fator que implica na porosidade da superfície aspergida (MCPHERSON, 1981).

3.6.6 Dureza do revestimento

Pode ser definida a dureza como sendo uma resistência à penetração que um material apresenta. Muitas vezes se procura através dos revestimentos aspergidos

melhorarem essa propriedade, aumentando assim a vida útil de componentes (PAREDES, 2012).

Para avaliar essa propriedade nos revestimentos, são realizados teste de dureza, que podem ser por riscamento e por endentação.

A endentação baseia-se no princípio da penetração de um penetrador padronizado em uma superfície, sob uma carga previamente conhecida. Onde a marca deixada na superfície é medida com auxílio de tabelas, sendo possível obter o valor da dureza.

Como os revestimentos são obtidos por formação de lamelas sobrepostas, onde há a presença de poros e óxidos, os valores de dureza no interior de um mesmo revestimento irão variar, pois os revestimentos são anisotrópicos. Em um revestimento termicamente aspergido que tem como característica uma estrutura lamelar tem uma natureza heterogênea, isto é, com variações de espessura, presença de óxidos e poros o que resulta em diferentes valores de dureza dentro de um revestimento (PAREDES, 2012).

Atentar que os valores tanto de macro e microdureza não deve ser comparada com o material bruto de outra forma que não seja por aspersão térmica.

O ensaio de dureza usualmente utilizado em superfícies com carbeto de tungstênio é o ensaio Vickers, no qual será utilizado neste trabalho que seguirá o procedimento padrão em conforme com as normas ASTM E92-82 e ASTM A1038.

3.6.6.1 Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi desenvolvido em 1925 por Smith e Sandland e o nome que foi batizado o ensaio ficou conhecido porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga (UNESP, 2018).

O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de

impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte:

$$HV = \frac{F}{A}$$

Após todas as conversões, a fórmula chega a fase final, onde F é a carga aplicada e D é média aritmética das duas diagonais, a formula é descrita abaixo.

$$HV = \frac{1,8544 * F}{D^2}$$

Em superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) ou para determinar a dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o ensaio de dureza Vickers, que envolve o mesmo processo, porém com cargas menores de 10 kgf (UNESP, 2018).

Confira abaixo algumas vantagens do uso do ensaio de dureza Vickers:

- O ensaio de dureza Vickers fornece uma escala contínua de dureza;
- As impressões são tão pequenas que na maioria dos casos não inutilizam as peças, nem mesmo as acabadas;
- O penetrador de diamante é praticamente indeformável;
- O ensaio de dureza Vickers pode ser usado em materiais de qualquer espessura e mede também durezas superficiais.

3.7 UTILIZAÇÃO E APLICAÇÕES

A aspersione térmica foi idealizada tendo em vista, como foco principal, a proteção contra corrosão e desgaste. São vários os equipamentos que tiram proveito dela para se protegerem do meio, principalmente da corrosão. Estruturas metálicas, carcaças de máquinas e equipamentos em geral, equipamentos e estruturas portuárias e de usinas hidrelétricas, tanques de armazenagem e produção, embarcações, torres, pontes, edifícios, tubulações, vagões, componentes de veículos, guindastes e trilhos são alguns deles.

Devido a sua ampla diversidade de materiais aspergidos e protegidos na aplicação

e seus vários métodos de execução, passou também a ser utilizada alvejando outros propósitos, tais como: (PAREDES, 2012).

3.7.1 Recuperação Dimensional

Através da Aspersão Térmica, materiais são dispostos em segmentos de dutos e tubulações que perderam espessura por meio da corrosão para que elas voltem total ou parcialmente a suas dimensões originais (NOVICKI, 2008).

3.7.2 Isolamento Térmico

Os revestimentos aplicados com objetivo de isolar o objeto termicamente, além de cumprir sua função, também proporcionam um aumento da vida útil da peça e uma economia significativa de energia, que seria desperdiçada sem o uso da camada. Via de regra, as camadas aplicadas são compostas de material cerâmico. São comumente utilizados em motores nas indústrias aeronáutica e automotiva, em componentes de mísseis e em sistemas de freio (WOLF; AFONSO, 2014).

3.7.3 Biocompatibilidade

Biomateriais utilizados em implantes podem ser revestidos por uma fina camada utilizando a aspersão térmica, visando um aumento da resistência à corrosão e das propriedades mecânicas superficiais utilizando revestimentos biocompatíveis. São utilizados na proteção de implantes odontológicos e ortopédicos (VALERETO, 1998).

4 METODOLOGIA

Neste trabalho foi avaliada a dureza do revestimento aplicado por aspersão térmica nas amostras.

4.1 PESQUISA

Para a realização da análise do tema abordado deste trabalho, foram realizadas pesquisas bibliográficas em diversos livros, revistas, artigos, dissertações, teses e páginas da internet, a fim de reunir informações necessárias para embasar todo o conhecimento teórico do assunto estudado, sendo possível o entendimento das características de todo o processo de aspersão térmica, e as propriedades dos materiais envolvidos. Na fase de realização dos testes para averiguação das características do material em estudo, foram feitas pesquisas em normas que regulamentam os métodos a serem seguidos.

4.2 TESTES

A fase de realização dos testes foi dividida nas seguintes etapas: escolha do processo de aspersão térmica por Flame Spray juntamente com o método de ensaio de dureza Vickers, fabricação dos corpos de prova, escolha do material do revestimento, preparação da superfície, aplicação do revestimento, acabamento superficial e a realização dos ensaios de dureza.

4.2.1 Método de aspersão por Flame Spray

A escolha da técnica de Aspersão Térmica por Flame Spray foi embasada na literatura por mostrar que esse método supre as características mecânicas da demanda de empresas que contratam esse tipo de revestimento superficial na região de Aracruz a fim de otimizar a vida útil de suas peças e equipamentos. Além das propriedades mecânicas serem satisfatórias para o objetivo do trabalho conforme a literatura, o processo de escolha por Flame Spray contou com um fator de grande importância, o apoio de uma empresa metalmecânica que se encontra na região litorânea de Aracruz, que concedeu a realização da metalização nos

corpos de prova onde se fez o método de aspersão térmica por pó de carbeto de tungstênio.

A escolha do ensaio de dureza também se deu através da análise da literatura que mostrou que o ensaio de dureza Vickers é bastante eficiente e utilizado para medir faixas de dureza, as quais se encaixa o valor médio de dureza do o carbeto de tungstênio, tendo esse método, valores satisfatórios segundo Paredes (2012) que possui literaturas voltadas para temas de métodos de aspersão térmica e para materiais que usam carbeto de tungstênio. A norma que estabelece o uso da dureza Vickers para materiais metálicos com dureza elevada como a do carbeto de tungstênio é a ABNT NBR ISO 6507.

4.2.2 Corpos de Prova

Para fabricação dos corpos de prova foi utilizada uma chapa de aço ABNT SAE 1020. Este aço foi escolhido por ser o material de base das peças metalizadas na empresa que faz a aspersão térmica e repassa a seus clientes. Esse material é comumente utilizado em confecção de peças em geral na indústria metalmeccânica. A figura 14 mostra os corpos de prova com as dimensões de 50 x 50 x 12 mm a fim de obter várias análises de dureza em um mesmo corpo de prova de acordo com as dimensões estabelecidas pelas normas ASTM E92-82 e ASTM A1038 para ensaios de dureza Vickers para o espaçamento entre as endentações com a utilização de um medidor de dureza portátil.

Figura 14 - Preparação dos corpos de prova



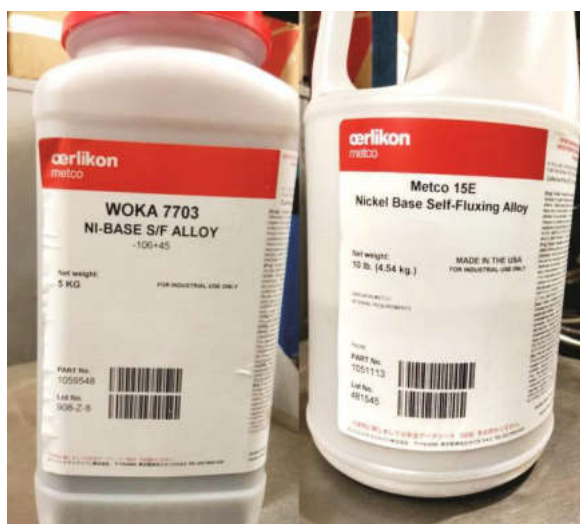
Fonte: Autor

4.2.3 Material do revestimento

A matéria prima utilizada para produção do revestimento avaliado neste trabalho foi o pó de carbeto de tungstênio da marca Metco modelo WOCA 7703 juntamente com o pó modelo Metco 15E contendo as demais ligas que compõe a mistura. A composição química e a porcentagem da mistura são fornecidas pelo fabricante em conformidade com os padrões de propriedades mecânicas exigidos pela empresa que faz o processo de aspersão térmica.

Os dados desta composição foram detalhados anteriormente na tabela 1. A escolha desta liga metálica foi baseada na alta dureza do revestimento obtido com este material, propriedade que irá repercutir suas aplicações envolvendo resistência mecânica, seja de peças novas ou reconcondionadas. A figura 15 mostra as embalagens do pó utilizado.

Figura 15 - Material utilizado na aspersão térmica por Flame Spray



Fonte: Autor

4.2.4 Preparação da Superfície

Após a fabricação, os corpos de prova passaram pelo processo de preparação superficial no qual foram submetidos ao processo de limpeza química a base de solventes orgânicos e em seguida, feito o desbaste abrasivo por meio de um esmeril com rebolo de granulatura fina para obtenção da rugosidade necessária para o processo de aspersão térmica. Apesar do método de jateamento abrasivo

ser o mais indicado, a norma ISO 8501-1 permite fazer a preparação da superfície por meio de lixamento para obter a rugosidade necessária quando o método de jateamento abrasivo é prejudicial ao equipamento podendo danificá-lo, estando próximo a motores, painéis elétricos e/ou outros equipamentos. Tendo em vista essa permissão da norma para o uso do método de lixamento para preparação superficial, foi utilizado tal método para obtenção da rugosidade necessária por ser também o método no qual a empresa que faz a aspersão térmica utiliza.

Esse método para obter a rugosidade normatizada preparando a superfície para o processo de aspersão térmica foi estudado de maneira empírica por Varasquim (2012) no qual foram feitos testes e que concluiu que o uso de um esmeril para a produção de rugosidade superficial supre as características necessárias que as normas internacionais estabelecem para estabelecer uma rugosidade necessária.

Após a obtenção da rugosidade nos corpos de prova, foi aplicado o auto ligante nos mesmos para obter a adesividade necessária para aplicação dos revestimentos conforme a norma ASTM C633. Os materiais auto ligantes são utilizados como uma técnica adicional de se conseguir uma preparação do substrato, ou seja, conferir a ele a rugosidade adequada. Estes materiais têm grande capacidade de ligação adesiva mesmo em substratos lisos e quando aplicados a substratos que passaram por um jateamento abrasivo, melhoram a aderência do revestimento (PAREDES, 2012). Esta etapa é primordial para o sucesso no resultado dos revestimentos. Na figura 16 é mostrado o processo de lixamento na superfície do corpo de prova.

Figura 16 - Processo de acabamento superficial do corpo de prova



Fonte: Autor

4.2.5 Aplicação do Revestimento

Para a aplicação do revestimento no substrato, a peça primeiramente é aquecida à 210° C, logo em seguida é feita a aplicação do revestimento. A tabela 2 mostra os parâmetros da aspersão. A pistola utilizada no processo de aspersão térmica por flame spray foi do modelo 5P-II da Metco (figura 17), que funciona com ar comprimido, oxigênio e acetileno conforme figura 18.

Figura 17 - Detalhes da pistola Flame Spray 5P da Metco



Fonte: Autor

Figura 18 - Processo de aplicação da aspersão térmica



Fonte: Autor

Tabela 2 - Parâmetros da aspersão térmica

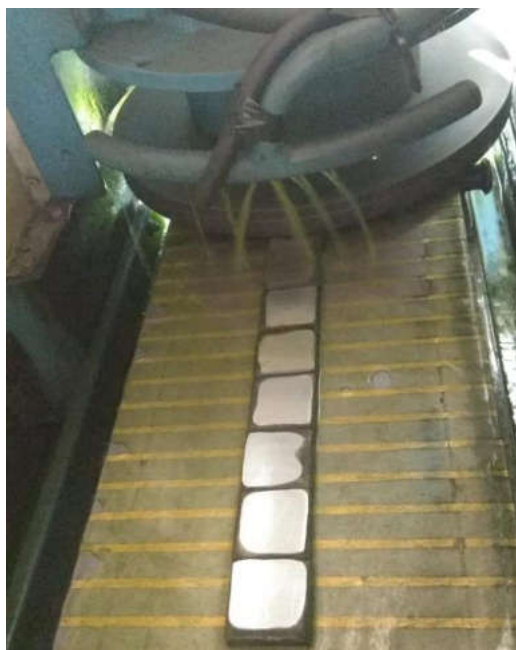
Descrição	Valores
Taxa de alimentação do pó	50 a 100 g/min
Taxa fluxo gás de transporte	3 a 5 litros/min
Vazão do Acetileno	34 SCFH (normal pé cúbico/hora)
Pressão do gás combustível (acetileno)	12 bar
Vazão do Oxigênio	34 SCFH (normal pé cúbico/hora)
Pressão Oxigênio	10 bar
Distancia aplicação	100 a 300 mm
Temperatura de pré-aquecimento	210° C
Temperatura de aplicação	790° C

Fonte: Autor

4.2.6 Acabamento Superficial

Com a superfície metalizada o corpo de prova passou novamente pelo processo de lixamento superficial para obtenção de uma superfície lisa com a finalidade de melhorar a coleta dos dados a serem realizado no ensaio de dureza. O processo de acabamento superficial foi realizado em uma retífica conforme figura 19. O objetivo é remover irregularidades e obter um acabamento liso e plano na face de teste dos corpos de prova, permitindo assim melhores leituras na máquina para o ensaio de dureza.

Figura 19 – Superfícies dos corpos de prova sendo preparados para o ensaio



Fonte: Autor

4.2.7 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em uma empresa metalmeccânica de Aracruz, utilizando um medidor de dureza portátil da marca NOVOTEST modelo UD3. O aparelho possui um range para a dureza Vickers que varia de 230 a 940 HV com uma precisão de 5 HV com uma carga aplicação de 50N. O método de medição de dureza desde equipamento está em conformidade com a norma ASTM A1038, que é destinada a aparelhos portáteis de medição de dureza em corpos de prova.

Os corpos de prova revestidos foram submetidos ao ensaio de dureza através do medidor de dureza portátil com uma carga de 50N. Foram realizadas três medições em regiões aleatórias dos revestimentos distanciadas à pelo menos 10 mm uma da outra, conforme a norma ASTM A1038.

Neste experimento essas medições foram realizadas na secção transversal, na direção perpendicular a superfície, o que se justifica um valor de dureza maior. Foram utilizados dois corpos de prova para cada distância de aplicação do revestimento, e foram feitas três medições em cada corpo de prova, totalizado seis medições de dureza para cada distância de aplicação aspergida. Não foi realizada

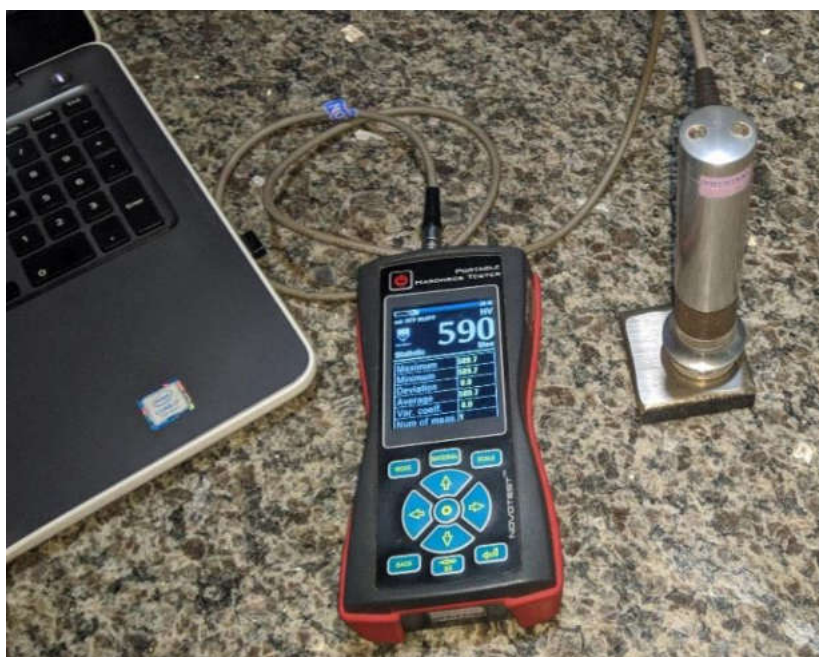
a medição de dureza no substrato e nem a medição da porosidade da camada aspergida, pois não era objetivo deste estudo. Detalhes dos corpos de prova e medições da dureza na figura 20 e 21.

Figura 20 - Corpos de prova a serem feitos os ensaios



Fonte: Autor

Figura 21 - Medidor de dureza portátil com medição de dureza Vickers



Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIO 1 – APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 100 MM DO SUBSTRATO

No primeiro ensaio foram utilizadas as peças metalizadas com distância de 100 mm entre a pistola e o substrato do corpo de prova. Para esse teste foram utilizados dois corpos de prova que tiveram êxito durante o processo. O comportamento dos corpos de prova e os valores detalhados estão apresentados nas tabelas 3 e 4 e gráficos 1 e 2 a seguir.

Tabela 3 – Resultados da dureza do ensaio 1 com distância de 100 mm

Corpo de Prova	Dureza 1 (HV)	Dureza 2 (HV)	Dureza 3 (HV)	Média da Dureza (HV)
1	604,30	571,70	641,20	605,73
2	587,10	572,5	620,70	593,43

Tabela 4 – Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 1

Corpo de Prova	Dureza (HV)	Dureza Média (HV)
1	605,73	599,58
2	593,43	

Gráfico 1 – Variação da dureza no ensaio 1 com 100 mm de distância

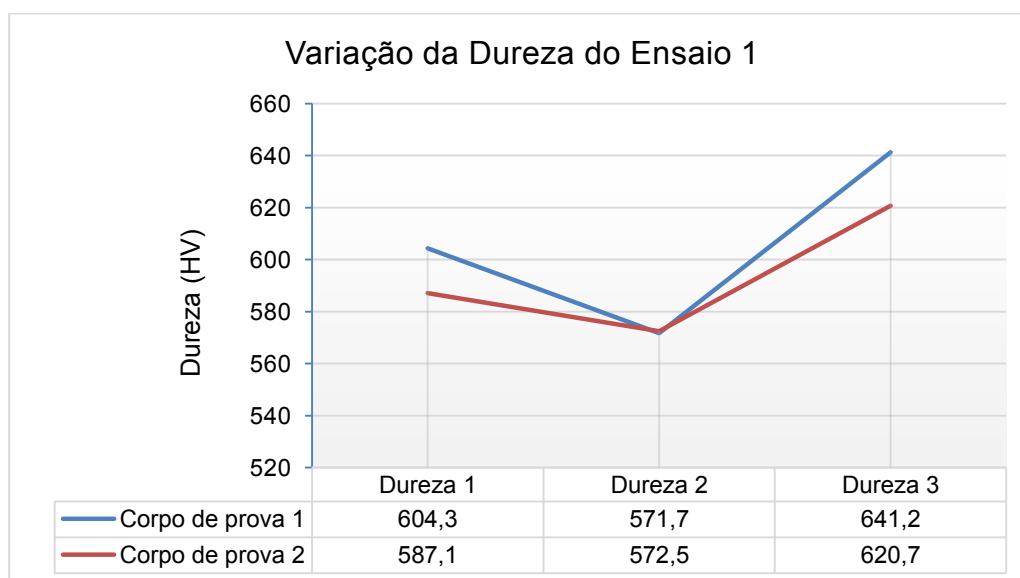
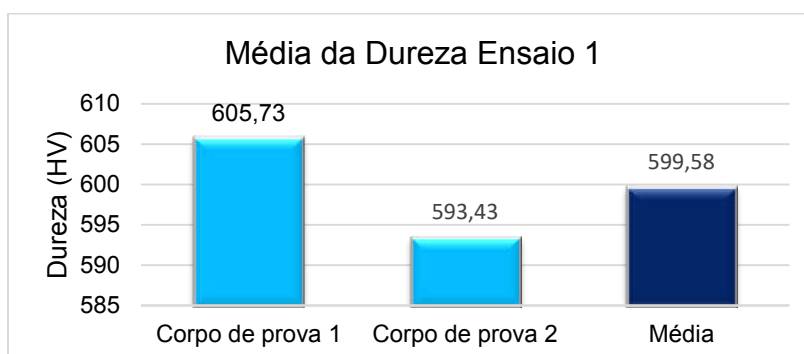


Gráfico 2 – Média final de dureza dos corpos de prova do ensaio 1



5.2 ENSAIO 2 - APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 200 MM DO SUBSTRATO

Para o segundo ensaio, foram utilizadas peças metalizadas com 200 mm de distância entre a pistola e o substrato do corpo de prova. Assim como no primeiro teste, foram utilizados dois corpos de prova. Resultados nas tabelas 5 e 6 e gráficos 3 e 4 abaixo.

Tabela 5 - Resultados da dureza do ensaio 2 com distância de 200 mm

Corpo de Prova	Dureza 1 (HV)	Dureza 2 (HV)	Dureza 3 (HV)	Média da dureza (HV)
3	599,60	588,90	584,20	590,90
4	585,90	585,00	593,80	588,20

Tabela 6 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 2

Corpo de Prova	Dureza (HV)	Dureza Média (HV)
3	590,90	589,55
4	588,20	

Gráfico 3 - Variação da dureza no ensaio 2 com 200 mm de distância

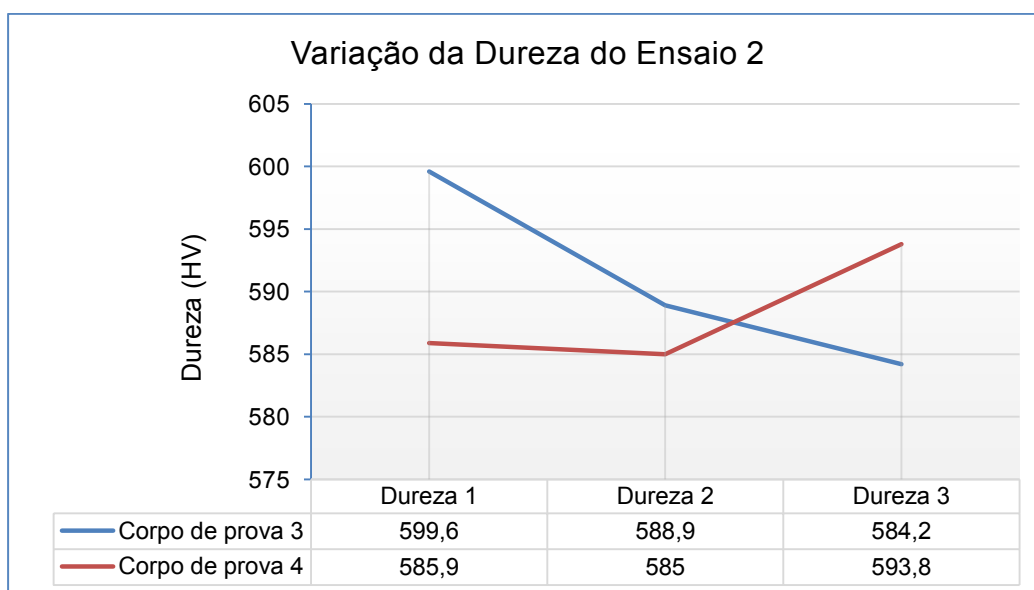
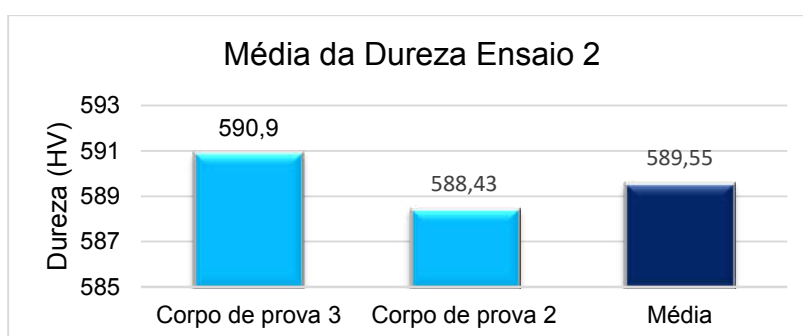


Gráfico 4 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 2



5.3 ENSAIO 3 - APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO À 300 MM DO SUBSTRATO

No terceiro ensaio também foram utilizados dois corpos de prova metalizados com 300 mm de distância entre a pistola de metalização e o material base. Os valores de dureza são apresentados a seguir nas tabelas 7 e 8 e gráficos 5 e 6.

Tabela 7 - Média da dureza no ensaio 3 com 300 mm de distância

Corpo de Prova	Dureza 1 (HV)	Dureza 2 (HV)	Dureza 3 (HV)	Média da Dureza (HV)
5	577,90	563,20	571,60	570,90
6	571,00	581,10	567,40	573,17

Tabela 8 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 3

Corpo De Prova	Dureza (HV)	Dureza Média (HV)
5	570,90	572,04
6	573,17	

Gráfico 5 - Variação da dureza no ensaio 3 com 300 mm de distância

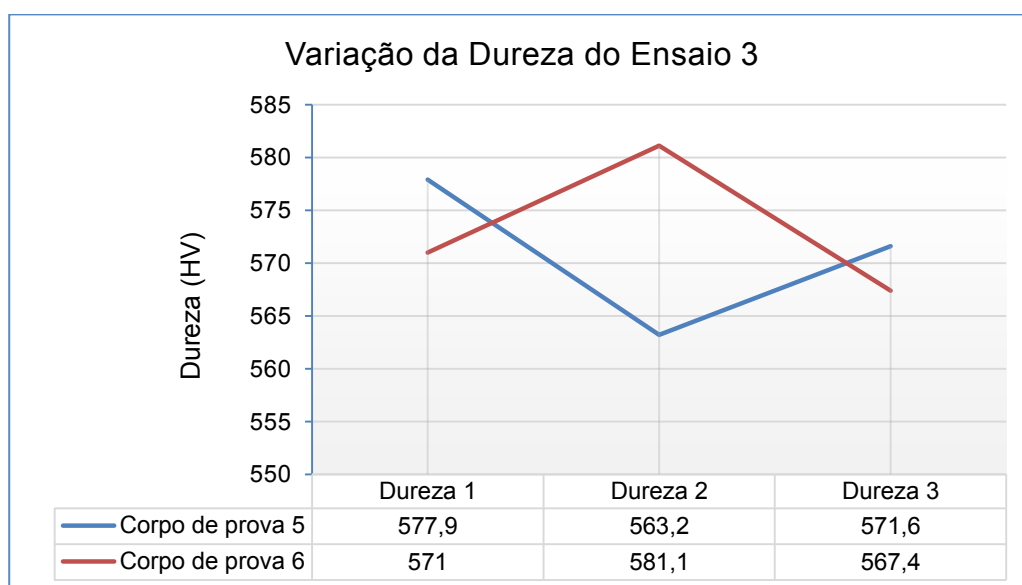
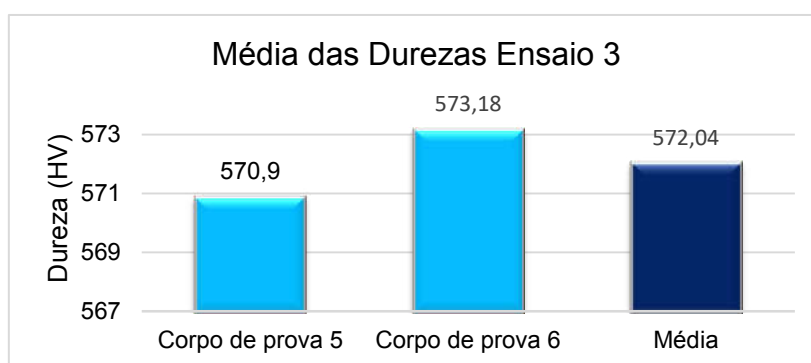


Gráfico 6 - Média final de dureza dos corpos de prova no ensaio 3



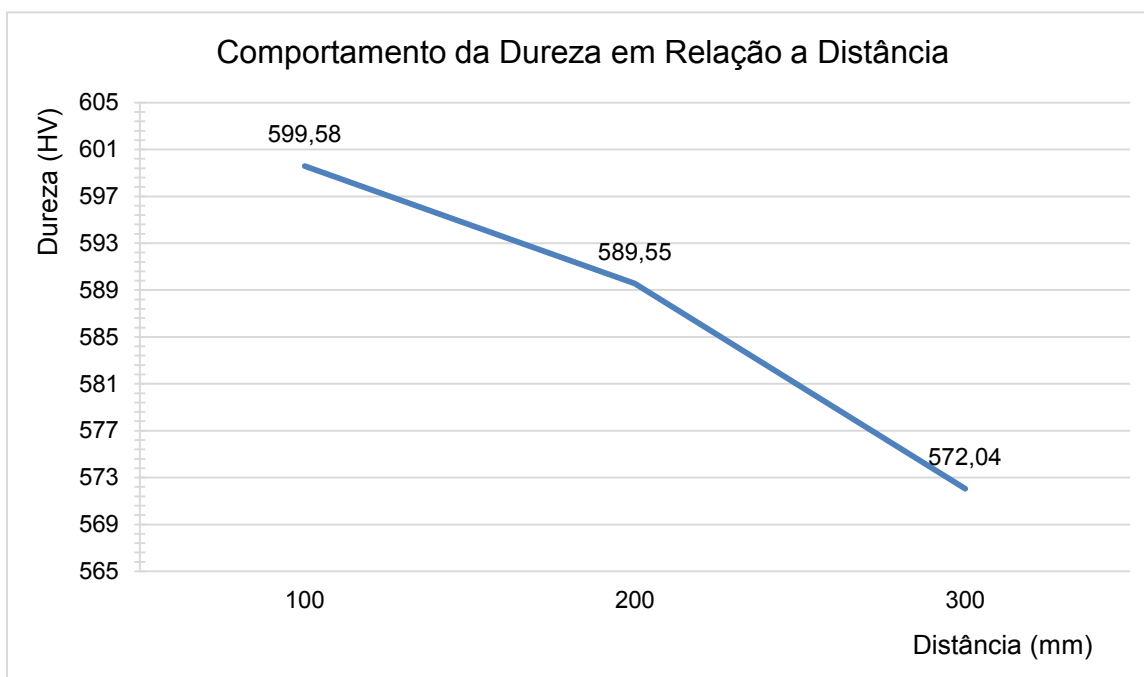
Após os ensaios e a verificação dos resultados, constatou-se que para cada corpo de prova, foram apresentados resultados diferentes para os valores de dureza devido a superfície aspergida ser anisotrópica. No entanto com a média dos resultados é possível observar uma diminuição na dureza à medida que a distância de aplicação no processo de aspensão é aumentada, o que torna plausível os resultados obtidos. No primeiro ensaio realizado com corpos de prova à 100 mm de distância entre a peça e a pistola de metalização, encontrou-se o

valor de dureza média equivalente à 599,58 HV. Para os corpos de prova que foram metalizados com distância de 200 mm obteve-se a dureza de 589,55 HV e para os corpos de prova metalizados com distância de 300 mm, conseguiu-se dureza de 572,04 HV, resultados estes que estão listados na tabela 9 e no gráfico 7.

Tabela 9 - Relação dos ensaios com as durezas médias

Ensaio	Descrição do Teste	Dureza (HV)
1	Aspersão realizada à 100 mm de distância	599,58
2	Aspersão realizada à 200 mm de distância	589,55
3	Aspersão realizada à 300 mm de distância	572,04

Gráfico 7 – Comportamento da dureza em relação a distância de aplicação da aspersão



Com as comparações dos resultados obtidos é possível verificar conforme o gráfico 7 que para os corpos de prova que foram feitos a metalização com distância de 100 mm, obteve-se um valor médio maior (599,58 HV) se comparados com as peças que foram metalizadas com 200 mm e 300 mm respectivamente. Isso se explica pois quanto maior a proximidade entre a pistola de metalização e o substrato, menor a distância a ser percorrida pelo material aspergido até chegar a superfície do corpo de prova e conseqüentemente o pó colidirá com o substrato a uma

velocidade maior. Os resultados obtidos estão compatíveis com a literatura consultada (Rijeza, 2011).

Carvalho (2007) realizou ensaios de microdureza em uma liga de carbeto de tungstênio aplicados por aspersão térmica pelo método de arco elétrico, obtendo um valor médio de 602 HV a uma distância de 100 mm, sendo os resultados deste trabalho compatíveis com a literatura.

Como no processo de aspersão térmica a resistência mecânica dessas partículas é um ponto fundamental a ser considerado para a qualidade da metalização e a distância da pistola influencia diretamente nessa propriedade, isso acaba possibilitando a metalização com menores distâncias pois há probabilidade superior de se obter durezas maiores. Quando se aumenta a distância entre a pistola de metalização e a peça metalizada, a dureza vai diminuindo, comprovando assim a influência da distância nessa propriedade (VIDAL, 2012).

Um estudo feito por Maranhão (2006) mostra que suas análises de dureza em comparação com os resultados obtidos neste trabalho são compatíveis, tornando satisfatórios os resultados obtidos através da coleta dos dados deste estudo, pois comparando o estudo de Maranhão (2006) para distâncias semelhantes de aspersão, podemos observar resultados de ensaios de dureza bem próximos aos resultados deste trabalho, tornando-os plausíveis.

Segundo os estudos feitos através da pesquisa de diversas literaturas, a influência do parâmetro da distância influencia também no aspecto da dureza e porosidade do revestimento metálico, que segundo Manfrinato (2010) a velocidade do impacto das partículas no substrato no processo de aspersão térmica é influenciada pela distância de aplicação, uma vez que as partículas perdem energia cinética e calor antes de se chocarem à peça, o que interfere na porosidade da camada acarretando partículas não fundidas. Também nessa mesma linha de pesquisa

Maranhão (2006), também fala que a quantidade de poros nos revestimentos aspergidos termicamente depende do material e das condições de aspersão de cada processo. Como, por exemplo, temperatura, velocidade das partículas e distancia da pistola ao substrato. Assim, através da variação de um mesmo parâmetro, a distância da pistola ao substrato, é possível alterar não somente a

dureza do material, mas também a porosidade da camada. No entanto, como o objetivo deste trabalho está voltado para o aspecto de dureza e sua resistência mecânica no meio industrial, fica como sugestão de trabalhos futuros, estudar a influência da distância no aspecto da porosidade das camadas aspergidas.

6 CONCLUSÃO

Após as análises dos resultados obtidos através dos ensaios de dureza, foi possível concluir que a distância de aplicação do material no processo de metalização influencia na dureza superficial obtida, pois os resultados mostraram mudanças significativas quanto à dureza dos corpos de prova. A medida que a distância entre a pistola e substrato da peça é aumentada, a dureza sofre uma diminuição.

Através desta análise é possível dizer que a distância de aplicação é inversamente proporcional à dureza na superfície aspergida, ao passo que se diminuirmos a distância, aumentamos a dureza, e quando aumentamos a distância de aplicação, diminuimos a dureza na superfície metalizada.

Com isso, a partir dos testes realizados e pesquisas desenvolvidas neste trabalho, fica evidente a importância da análise dos parâmetros no processo de aspersão térmica. Pois ao utilizar parâmetros melhores definidos torna-se possível obter uma qualidade maior do produto final, garantindo assim um melhor desempenho na função que a peça irá executar.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como todos os revestimentos aplicados no substrato foram realizados pelo processo manual e com parâmetros indicados pelo aplicador, fica a sugestão para desenvolvimento de um processo automático, haja vista que a velocidade e a distância de aplicação dos revestimentos têm forte influência na aderência do substrato, reduzindo a formação de poros e vazios;

- Avaliar a porosidade do revestimento;
- Avaliar outros métodos de aspersão térmica;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, ABNT NBR ISO 4287:2002.

ASTM C633, 2001, **Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coating**, Drawing is copyright ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org.

ASTM A1038-19, **Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org

ASTM E92-82(2003), **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, www.astm.org

ASTM E2109-01(2014), **Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM E384-16, **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

AWS, American Welding Society, **Thermal Spraying**. Practice, theory and applications, 2017.

BORGES, Maria C. C. F. **Tecnologia Mecânica II**. São Paulo, 2010, 44 f. Apostila do Curso Técnico em Mecânica, Centro Paula Souza.

CAMARGO, Fabio. **Ogramac Metalização** (ogramac@ogramac.com.br). (06/1999). Preaquecimento do substrato.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações**.

Arcelor Mittal, 2008.

CARVALHO, Paulo Rogerio de. **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico**, Dissertação Mestrado. UFPE - CTG, Recife (2007).

COUTO, L. C. O. **Aspersão Térmica na construção metálica - Ciência e Arte: Trabalho Técnico apresentado no Congresso Latino Americano da Construção Metálica**. 2006. ed. São Paulo: [s.n.], 2006. 11 p

GENTIL, Vicente. **Revestimentos: limpeza e preparo de superfícies**. Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Cap. 21. p. 228-234. HOWES, C. P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. *Welding Journal*, vol.73, abr. 1994

KREPSKI, R. P. **Thermal spray coating applications in the chemical process industries**. Houston, EUA: Nace International, 1993. p. 252

LIMA, Carlos C; TREVISAN, Roseana. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artliber editora, 2007.

MANFRINATO, M. D. *et al.* Metallic Coating Adhesion Obtained Through Spraying Testing. *In: 18º International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering*, 2010, Rio de Janeiro/RJ, 2010.

MARANHO, O.; SINATORA, Amilton. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARIANO, Carolina. **Obtenção de Revestimentos de Nióbio Depositados por Aspersão Térmica para Proteção à Corrosão Marinha**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do

Paraná, Curitiba.

MARQUES, P. V. **Aspersão Térmica**. Infosolda, 2003. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/aspersotermica.pdf.

MCPHERSON, R. **The relationships between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma-sprayed coatings**. Thin solids films, vol. 83, n. 3, p. 297-310, 1981.

MELLALI, M.; GRIMAUD, A.; Leger, A. C., FAUCHAIS, P. **Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation**. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 6, n. 2, p. 217-226, June 1997

MENEZES, Dayanne D. **Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional, em meio Cloreto**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

NASCIMENTO, RECLA E SILVA, **Análise dos processos de aspersão térmica por flame spray e plasma a arco transferido – estudo do perfil de dureza e resistência ao desgaste microabrasivo**, 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos, Natal, RN, Brasil 2016.

NOVICKI, Nilceu. **Aplicação da Aspersão Térmica na Soldagem em Operação de Tubulações com Pequena Espessura Remanescente**. 2008. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PAREDES, Ramón S. Cortés. **Aspersão Térmica**, Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Materiais e Tratamento de Superfície, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PAWLOWSKI, Lech. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

POLLNOW, Edilson Nunes. **Aspersão Térmica: Um Método Limpo e Eficiente para a Substituição do Cromo Duro**. Rio Grande do Sul: Rijeza Metalurgia.

RIJEZA METALÚRGICA LTDA. Parâmetros de Aspersão Térmica – HVOF para WC-CoCr. Porto Alegre – Brasil (2011).

SANTOS, Ricardo L. Cardoso. **Deposição por Plasma de Arco Transferido com Corrente Contínua Pulsada**. 2003. 76 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCHIEFLER FILHO, M. F. O. et al. Influence of Process Parameters on the Quality of Thermally Sprayed X46Cr13 Stainless Steel Coatings. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, Vol. XXVI, n. 1, p. 98-106, Jan-Mar 2004.

VALERETO, I. C. L. **Caracterização de Implantes Dentais da Liga Ti6Al7Nb Revestidos por Hidroxiapatita pela Técnica Plasma-Spray**. 1998. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear de Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

VARASQUIM, Francisco Mateus Faria de Almeida et al. Influência da velocidade de corte, granulometria da lixa e pressão no lixamento de ligas de aço. CERNE [online]. 2012, vol.18, n.2, pp.231-237. ISSN 0104-7760. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/94435/1/zacarias_d_me_guara.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2019

VIDAL, Gabriel G. O. **Procedimentos Envolvidos e Benefícios da Aspersão Térmica como Processo para Revestimento de Superfície**. 2012. 24 f. Artigo

(Graduação em Engenharia Mecânica), UNIFACS - Universidade Salvador, Salvador.