

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ GUILHERME MARIN

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DO AR COMPRIMIDO NO PROCESSO DE  
ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NO REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL  
AISI 309L DEPOSITADO SOBRE O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

CURITIBA PR

2020

LUIZ GUILHERME MARIN

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DO AR COMPRIMIDO NO PROCESSO DE  
ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NO REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL  
AISI 309L DEPOSITADO SOBRE O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Manufatura*.

Orientador: Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

Coorientador: Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA PR

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

M337a Marin, Luiz Guilherme  
Análise da influência do aquecimento do ar comprimido no processo de aspersão térmica por arco elétrico no revestimento de aço inoxidável AISI 309L depositado sobre o aço inoxidável AISI 304 [recurso eletrônico] / Luiz Guilherme Marin – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.  
Coorientador: Dr. Christian Scapulatempo Strobel

I. Revestimento inoxidável. 2. Oxidação das Partículas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Paredes, Ramón Sigifredo Cortés. III. Strobel, Christian Scapulatempo. IV. Título.

CDD: 671.73

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUIZ GUILHERME MARIN** intitulada: **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DO AR COMPRIMIDO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NO REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 309L DEPOSITADO SOBRE O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


CURITIBA, 18 de Dezembro de 2020.



RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES  
Presidente da Banca Examinadora



KLEBER FRANKE PORTELLA  
Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O  
DESENVOLVIMENTO )



Author's Signature

João Roberto Sartori Moreno  
Print Name

JOAO ROBERTO SARTORI MORENO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ)



GUSTAVO BAVARESCO SUCHARSKI  
Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O  
DESENVOLVIMENTO)

*Aos meus pais Luiz Mario e Francisca.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Luiz Mario e Francisca pela dedicação e incentivo em todas as etapas de minha vida.

Ao Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes e ao Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel, pela orientação e apoio, além do conhecimento científico a mim transmitidos, fundamentais durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica que forneceram apoio técnico e valiosos conhecimentos, contribuindo com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais, em especial ao Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski, pelo apoio na execução das atividades práticas.

À Profa. Dra. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio, por viabilizar a execução dos ensaios por MEV no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

## RESUMO

Dentre os diferentes processos de revestimento por aspensão térmica, o de arco elétrico tem se mostrado um dos mais interessantes, devido a sua relativa simplicidade do equipamento, fácil operação, baixo custo dos consumíveis, elevada taxa de deposição e formação de um revestimento com boas propriedades metalúrgicas, com grande aplicação na recuperação de superfícies que sofreram cavitação. Ainda assim, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos de forma a aprimorar ainda mais a qualidade dos revestimentos obtidos, principalmente no que diz respeito à redução da oxidação, porosidade e coesão entre as camadas. Este trabalho tem como objetivo a melhoria destas propriedades por meio do aquecimento do ar comprimido como gás de arraste, buscando obter uma menor variação de temperatura entre as partículas em voo e aquelas já aderidas ao substrato, reduzindo os efeitos da oxidação das partículas e por consequência a oxidação final do substrato, bem como reduzir a taxa de resfriamento das lamelas previamente depositadas e também do substrato, de forma a obter um gradiente de temperatura mais homogêneo durante o revestimento. Os testes foram conduzidos com um equipamento de aquecimento do gás desenvolvido especialmente para este trabalho, produzindo um revestimento de Aço Inoxidável AISI 309L depositado sobre o Aço Inoxidável AISI 304, combinação de materiais muito utilizados na recuperação de pás e rotores hidráulicos que sofreram desgaste por cavitação. Os ensaios conduzidos neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, especialmente no que diz respeito à redução do percentual de óxidos e na coesão entre as lamelas depositadas, evidenciando que houve uma redução dos óxidos e significativa melhora da molhabilidade das lamelas depositadas, além da promoção de uma redução das tensões residuais observadas no revestimento proveniente da diminuição dos ciclos de aquecimento e resfriamento observados durante a aplicação das sucessivas camadas.

Palavras-chave: Oxidação das Partículas. Revestimento Inoxidável. Aquecimento do Gás de Arraste

## ABSTRACT

Among the different thermal spray coating processes, the Arc Spray Process has been one of the most interesting due to its relative equipment simplicity, easy operation, relative low cost of consumables, high deposition rate and coating formation with good metallurgical properties, with a vast applicability in the recovery of surfaces eroded by cavitation. Nevertheless, several studies have been developed in order to further improve the quality of the obtained coatings, especially with regard to the reduction of oxidation, porosity and cohesion between the layers. This work seeks to improve these properties by heating the compressed air acting as a carrier gas, aiming to obtain a smaller temperature variation between the particles in flight and those already adhered to the substrate, reducing the oxidation effects on those particles, and then the final oxidation in the final coat, also, this work aims to reduce the cooling of the previously deposited lamellae and substrate. The tests were made with the carrier gas heating equipment, specially created for this work for the deposition of AISI 309L Stainless Steel under an AISI 304 Stainless Steel substrate, a material combination present in the cavitation recovery processes. Tests showed interesting results regarding the reduction of oxide percentage and cohesion between the deposited lamellae, showing that there was a significant reduction in oxides and even an improvement in the splats wetting, with a reduction of the coating residual stress due to the reduction of the successive heating and cooling cycles observed during the coating application.

Keywords: Particles Oxidization. Stainless Steel Coatings. Carrier Gas Heating

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DA FORMAÇÃO DA CAMADA PASSIVA . . . . .	16
FIGURA 2 – CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA UM METAL QUE APRESENTA TRANSIÇÃO ATIVA-PASSIVA . . . . .	17
FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DA SÉRIE 300 . . . . .	19
FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DA SÉRIE 400 . . . . .	19
FIGURA 5 – PRINCÍPIO DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA . . . . .	21
FIGURA 6 – MORFOLOGIA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS POR DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA . . . . .	22
FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA DE ACORDO COM A FONTE DE ENERGIA . . . . .	23
FIGURA 8 – ESQUEMA DOS EQUIPAMENTOS PARA ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	24
FIGURA 9 – ESQUEMA DO PROCESSO DE ASPERSÃO POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	24
FIGURA 10 – FOTOGRAFIA DO MOMENTO EM QUE OCORRE O DESTACAMENTO DAS PARTÍCULAS NA PONTA DOS ARAMES . . . . .	25
FIGURA 11 – MICROESTRUTURA TÍPICA DE UM REVESTIMENTO APLICADO POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	26
FIGURA 12 – TIPOS DE LAMELAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO . . . . .	29
FIGURA 13 – FONTES DE OXIDAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	30
FIGURA 14 – MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS ÓXIDOS NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	31
FIGURA 15 – ÓXIDOS E VAZIOS FORMADOS NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	32
FIGURA 16 – PARTÍCULA RESSOLIDIFICADA COM CASCA DE ÓXIDOS . . . . .	32
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TENSÃO RESIDUAL EM UM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA . . . . .	33
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO DA TEMPERATURA DE DEPOSIÇÃO NA TENSÃO RESIDUAL EM UM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA . . . . .	34
FIGURA 19 – MICROESTRUTURA DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 309L DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	35

FIGURA 20 – MICROESTRUTURA DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	35
FIGURA 21 – ANÁLISE POR EDS DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	36
FIGURA 22 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO TIPO CRUZETA CERÂMICA . . .	39
FIGURA 23 – DISPOSITIVO DE AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE . . .	39
FIGURA 24 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS . . . . .	40
FIGURA 25 – TELA DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS . . . . .	41
FIGURA 26 – ESQUEMA DE FIXAÇÃO DO SENSORES PARA ANÁLISE DO PERFIL DO TÉRMICO . . . . .	41
FIGURA 27 – EQUIPAMENTO TECNAR DPV EVOLUTION MONTADO NO LABATS . . . . .	42
FIGURA 28 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE DOBRAMENTO	43
FIGURA 29 – PADRÕES PARA AVALIAÇÃO DAS TRINCAS E DESCONTINUIDADES EM REVESTIMENTOS . . . . .	44
FIGURA 30 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA THRESHOLD PARA DETERMINAÇÃO DE ÓXIDOS . . . . .	45
FIGURA 31 – PERFIL TÉRMICO DO PROCESSO DE ASPERSÃO POR ARCO ELÉTRICO . . . . .	46
FIGURA 32 – HISTOGRAMA TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS - SEM E COM AQUECIMENTO . . . . .	49
FIGURA 33 – HISTOGRAMA VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS - SEM E COM AQUECIMENTO . . . . .	50
FIGURA 34 – HISTOGRAMA DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS - SEM E COM AQUECIMENTO . . . . .	51
FIGURA 35 – MICROSCOPIA DO REVESTIMENTO SEM E COM AQUECIMENTO DO GÁS ARRASTE . . . . .	52
FIGURA 36 – MICROSCOPIA DO REVESTIMENTO SEM E COM AQUECIMENTO DO GÁS ARRASTE . . . . .	53
FIGURA 37 – PERCENTUAL DE ÓXIDOS E POROS NO REVESTIMENTO . .	54
FIGURA 38 – MEV DO REVESTIMENTO SEM AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE . . . . .	56
FIGURA 39 – MEV DO REVESTIMENTO SEM AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE NAS REGIÕES OR E CR . . . . .	57
FIGURA 40 – MEV DO REVESTIMENTO COM AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE . . . . .	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DIFERENÇAS ENTRE OS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	23
TABELA 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO . . . . .	38
TABELA 3 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA O ENSAIO DE DOBRAMENTO	44
TABELA 4 – TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS [ ° C] . . . . .	48
TABELA 5 – VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS [m/s] . . . . .	49
TABELA 6 – DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS [µm] . . . . .	50
TABELA 7 – PERCENTUAL DE ÓXIDOS E POROS NO REVESTIMENTO . .	54
TABELA 8 – RESULTADOS EDS SEM AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE	55
TABELA 9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA REGIÃO DE CROMO RETIDO . . .	56
TABELA 10 – RESULTADOS EDS COM AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE	58
TABELA 11 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME UTILIZADO . . . . .	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	AÇO INOXIDÁVEL	16
2.1.1	Aço Inoxidável Austenítico	19
2.2	ASPERSÃO TÉRMICA	20
2.2.1	Aspersão Térmica por Arco Elétrico	23
2.2.2	Parâmetros que Influenciam o Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico	27
2.2.3	Fontes de Oxidação no Processo de Aspersão Térmica	29
2.2.4	Tensão Residual dos Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica	33
2.2.5	Aspersão Térmica de Aços Inoxidáveis	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1	ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO	37
3.1.1	Preparo dos Corpos de Prova	37
3.1.2	Revestimento por Aspersão Térmica	37
3.1.3	Pré-Aquecimento do Substrato	38
3.2	AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE E AQUISIÇÃO DE DADOS	38
3.2.1	Equipamento para Aquecimento do Gás de Arraste	38
3.2.2	Sistema de Aquisição de Temperatura	40
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS	41
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO	42
3.4.1	Análise da Aderência por Dobramento	43
3.4.2	Análise Microscópica	44
3.4.3	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1	PERFIL TÉRMICO NO PROCESSO DE ASPERSÃO	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS	48
4.2.1	Temperatura das Partículas	48
4.2.2	Velocidade das Partículas	49
4.2.3	Diâmetro das Partículas	50
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO	51
4.3.1	Análise da Aderência por Dobramento	51
4.3.2	Análise Microscópica do Revestimento	52

4.3.3	Análise por MEV/EDS . . . . .	55
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>60</b>
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos produzidos pelos processos de aspersão térmica vêm se consolidando como processos de proteção de superfícies, pela aplicação de revestimentos resistentes a corrosão, ao desgaste e a elevadas temperaturas bem como na recuperação de superfícies, que é o caso de peças que onde são observadas a ação da erosão por cavitação. Essa gama de aplicações são encontradas nas mais diversas áreas da Engenharia, partindo da Indústria de petróleo e gás, até a aeroespacial.

Usualmente, o metal de adição utilizado é mais nobre do que aquele do substrato no que diz respeito as propriedades mecânicas e metalúrgicas. É o caso do revestimento de um aço comum por aço inoxidável, para conferir resistência a corrosão a uma determinada estrutura, ou então um revestimento resistente a elevadas temperaturas. Quando a finalidade do processo é a recuperação de superfícies, algumas ligas são mais utilizadas, como a liga AISI 309L, um aço inoxidável Austenítico, com baixo teor de carbono, muito utilizado na recuperação de superfícies de pás de bombas e turbinas hidráulicas que sofreram a perda de material mediante o processo de cavitação.

Neste caso, esses componentes podem ser fabricados de diferentes metais, sendo comum a utilização do Aço Inoxidável AISI 304, devido ao baixo custo, boas propriedades mecânicas e boa resistência a corrosão. A reparação de componentes fabricando com esse metal, pode ser realizado por diferentes processos, como o enchimento por Soldagem, porém, devido aos elevado aporte térmico deste processo, a técnica de enchimento e recuperação de superfícies através do processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico se mostra extremamente interessante, pois, não possui um aporte térmico agressivo quanto o processo de soldagem, mas ao mesmo tempo, possui boa aderência ao substrato.

Na busca do aprimoramento contínuo das técnicas que tragam melhores resultados, sejam eles metalúrgicos ou econômicos, diferentes processos foram sendo desenvolvidos ao longo dos anos, bem como melhorias foram sendo aplicadas naqueles que já estavam consolidados, desde a Aspersão Térmica por Chama, por Arco Elétrico, por Plasma, até as novas técnicas por *Cold Spray*, que vem ganhando maior visibilidade recentemente. Todos esses processos passaram cada um por diversos aprimoramentos, não podendo-se dizer que aqueles mais antigos se tornaram obsoletos, pois cada um apresenta determinadas vantagens e desvantagens em determinadas aplicações.

Desta forma, mesmo com o desenvolvimento de novos processos, o processo por Arco Elétrico, ainda se mostra muito competitivo, devido ao seu baixo custo e relativa simplicidade do equipamento, baixo custo do arame e o desenvolvimento da utilização de arames tubulares que possibilitam a deposição de ligas que antes não eram possíveis de serem utilizadas neste processo, fácil operação, relativa portabilidade do equipamento, o que permite a utilização em

campo, fator muito importante para fins de manutenção e recuperação de superfícies, dentre outros fatores.

Melhorias, como o desenvolvimento de novos bocais, que garantem a melhoria do fluxo de Ar Comprimido, de forma a aumentar a velocidade das partículas e melhorar a distribuição destas nas lamelas é um exemplo de pesquisas que foram desenvolvidas buscando aprimorar este processo, que já apresenta como característica uma relativa elevada energia cinética nas partículas, melhorando ainda mais a aderência e a coesão entre as lamelas, aumentando a qualidade do revestimento.

Este trabalho busca aprimorar o processo de aspensão térmica por arco elétrico através do aquecimento do gás de arraste, de forma a reduzir a taxa de resfriamento do revestimento, melhorando assim a coesão entre as lamelas depositadas e propiciando a deposição de um revestimento mais espesso, que rivalize com o obtido nos processos tradicionais de soldagem.

Outro ponto fundamental dos estudos que serão conduzidos é a formação de óxidos e intermetálicos, que pode levar à redução da resistência mecânica e da resistência a corrosão do revestimento, sabe-se que boa parte do óxido presente no revestimento tem origem durante o voo das partículas pelo contato com o gás de arraste, espera-se verificar neste trabalho a influência deste, podendo trazer em uma melhora substancial ao revestimento aspergido.

Para o processo de aspensão térmica, os principais parâmetros relativos a qualidade do revestimento dizem respeito a quantidade de porosidades e de óxidos formados na superfície depositada. A avaliação da formação de óxidos e intermetálicos é especialmente importante quando deseja-se trabalhar com revestimento inoxidáveis, onde a formação de óxidos de cromo é esperada, já que ela que irá conferir a propriedade antioxidante ao material, no entanto, a presença em uma determinada quantidade de outros óxidos não é desejada, podendo trazer problemas relativos a corrosão, seja ela localizada ou generalizada, prematura.

Neste trabalho, será avaliada a influência do aquecimento do gás de arraste, que tem como efeito esperado, a redução da umidade relativa do mesmo e também uma redução no resfriamento nas partículas aspergidas, além da redução da taxa de resfriamento da camada aspergida durante o processo de aspensão. Espera-se com isso, melhorar a coesão entre as camadas, o que pode permitir a deposição de camadas mais espessas, tornando o processo de recuperação de trincas por aspensão térmica mais interessante frente a outros processos que garantem uma grande taxa de deposição, como a soldagem, ainda, é esperada uma melhor molhabilidade das partículas, obtendo um revestimento com menor porosidade, reduzida taxa de óxidos e que também leva a uma melhor coesão final das camadas e maior aderência do revestimento.

Além dos efeitos que demonstram a qualidade mecânica do revestimento, espera-se melhorar as qualidades metalúrgicas do mesmo, observando que a taxa de resfriamento possui grande influência na formação de fases intermetálicas, que levam a uma melhora das propriedades mecânicas do revestimento e ainda de resistência a corrosão em especial nos revestimentos de Aço Inoxidável.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência do aquecimento do ar comprimido atuando como gás de arraste, no processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico, em um revestimento de Aço Inoxidável AISI 309L depositado sobre o Aço Inoxidável AISI 304 na qualidade do revestimento.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a viabilidade técnica da utilização do processo de aspersão térmica por arco elétrico com aquecimento do gás de arraste;
- Verificar a influência do pré-aquecimento do substrato em conjunto com o aquecimento do ar comprimido na qualidade do revestimento depositado;
- Verificar a influência do aquecimento do gás de arraste na taxa de resfriamento das partículas em voo e do substrato, através da análise por DPV e da avaliação do perfil térmico durante o processo de aspersão;
- Verificar a influência do aquecimento do ar comprimido no percentual de óxidos e poros no revestimento.

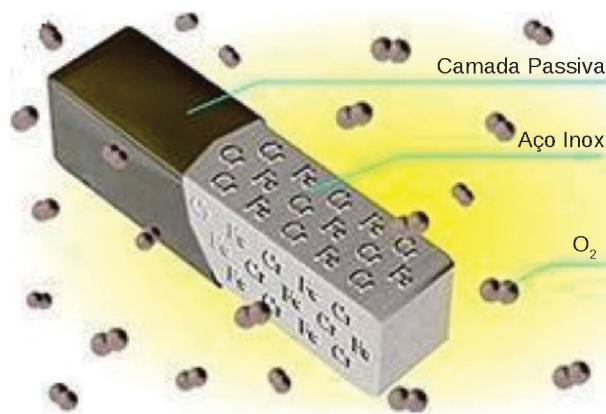
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas a revisão dos temas considerados mais importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que possuem como constituintes principais o Cromo e o Níquel, além de outros elementos de liga. O Cromo é o principal elemento de liga, sendo responsável por conferir a resistência à corrosão característica destes aços. Esta resistência à corrosão é obtida através da formação de uma camada de óxido de cromo na superfície do metal, quando em contato com o ar atmosférico ou outro ambiente oxidante, tendo como características principais, uma elevada estabilidade e homogeneidade, além de ser resistente a diversos meios corrosivos. A Figura 1 demonstra um exemplo da formação desta camada passiva no aço inoxidável.

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DA FORMAÇÃO DA CAMADA PASSIVA

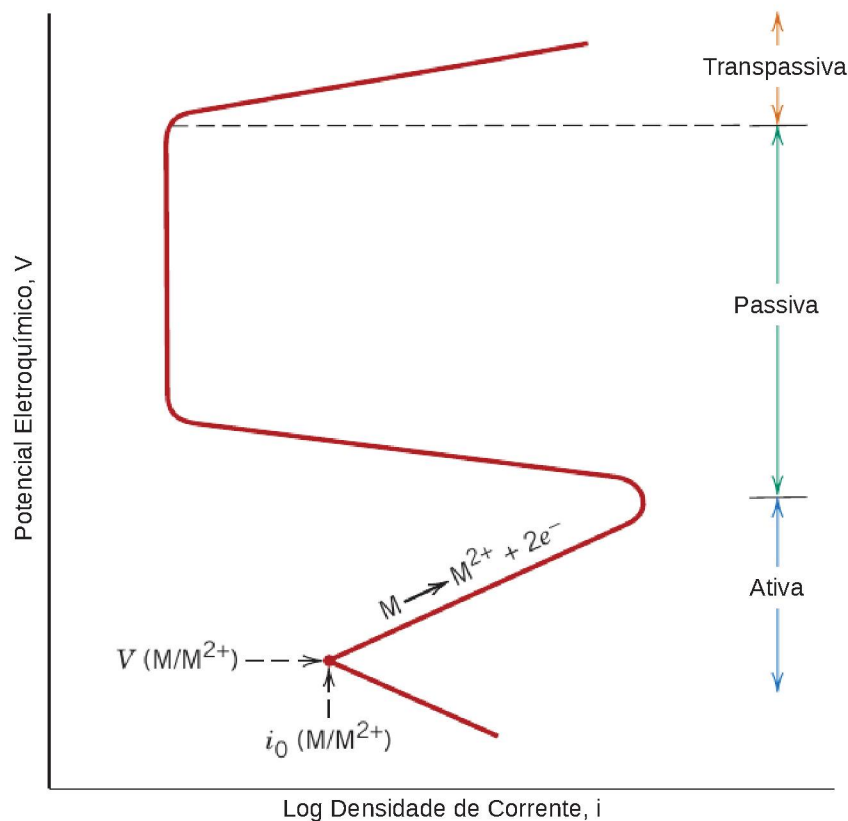


FONTE: Adaptado de Lima (2011).

Metais como o Aço Inoxidável e o Alumínio possuem uma elevada resistência a corrosão em função desta camada formada através do fenômeno de passivação, mesmo quando essas camadas de óxidos são danificadas, essa camada protetora normalmente é formada novamente. Esses metais apresentam uma curva de polarização similar a da Figura 2. Na região ativa, a curva é semelhante a outros metais que não passivam, tendo um comportamento linear entre a Densidade de Corrente e o Potencial Eletroquímico, nessa região é onde ocorre a oxidação. Com a formação da camada de óxido, o metal entra na região Passiva, onde a Densidade de Corrente fica independente do Potencial Eletroquímico, aumentando a resistência a oxidação. Porém, se o Potencial Eletroquímico continuar aumentando, o material irá entrar na região de

Transpassivação, onde a Densidade de Corrente volta a aumentar, ocorrendo novamente a corrosão do material (CALLISTER, 2007).

FIGURA 2 – CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA UM METAL QUE APRESENTA TRANSIÇÃO ATIVA-PASSIVA



FONTE: Adaptado de Callister (2007).

Para que pertença a categoria dos Aços Inoxidáveis, uma liga Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni deve conter necessariamente entre 10 a 12% de Cr em sua composição, ao contrário de diferentes ligas Fe-C que podem conter certo teor de Cr, que não são considerados Aços Inoxidáveis. Isto ocorre, pois somente a partir desta concentração começa a ocorrer a passivação, ou seja, a formação da camada passiva, formada por óxido de Cromo. O Níquel, assim como o Cromo, possui grande influência nos Aços Inoxidáveis, porém, atuando principalmente na estrutura cristalina do material, alterando algumas das propriedades mecânicas, como a resistência fluência, agindo como um elemento fortemente austenitizante na liga, no caso do Ni (CALLISTER, 2007).

Os aços inoxidáveis possuem ainda, em menor quantidade outros elementos, adicionados durante a fabricação e que garantem certas propriedades desejáveis ao material, como o Carbono, Silício, Manganês, Molibdênio, Nióbio, Titânio e o Nitrogênio, além daqueles elementos ditos indesejáveis, sendo os principais, o oxigênio, quando em grande quantidade, o fósforo e o enxofre. Durante o trabalho a quente, a microestrutura de um aço inoxidável dependerá do balanço da capacidade de seus diversos componentes em estabilizar a austenita ou a ferrita ou ambas na microestrutura até a temperatura ambiente (Outokumpu Stainless AB, 2013).

Diferentes classes de Aços Inoxidáveis são definidas de acordo com suas principais propriedades mecânicas e metalúrgicas e de resistência a corrosão, que estão fortemente relacionadas com sua composição química, conforme o esquema abaixo apresentado por Machado (2017).

- **Aços Inoxidáveis Ferríticos** – ligas ferro-cromo, contendo 10 a 30% de cromo e baixo teor de carbono. Possuem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Não são endurecíveis por meio de tratamento térmico, porém, são levemente endurecíveis por trabalho a frio. Principais aços deste grupo **AISI 430, 446, 502, 405, 410, 409**.
- **Aços Inoxidáveis Austeníticos** – ligas compostas por Cromo (16 a 30%) e Níquel (8 a 35%), com teor de carbono, geralmente inferior a 0,08%. Possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Os aços inoxidáveis austeníticos mais comuns são os da série 300, como por exemplo, o **AISI 301, 304, 308, 316**. Por questões econômicas, parte do níquel pode ser substituída por manganês ou nitrogênio, formando, assim, outro sistema nessa família, a série 200, como os aços **AISI 201, 202 e 204**.
- **Aços Inoxidáveis Duplex** – são ligas obtidas através do balanceamento de sua composição, normalmente com um teor de Cromo (23 a 30%), Níquel (2,5 a 7%) e Molibdênio (1 a 4%) e outros elementos, como titânio. Fazem parte desta família os aços **AISI 329, UNS S32304 e S31803**. Esses materiais têm microestrutura mista de ferrita e austenita, apresentando em certos meios resistência à corrosão e algumas propriedades mecânicas superiores aos dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.
- **Aços Inoxidáveis Martensíticos e Supermartensíticos** – são essencialmente ligas de Ferro-Cromo, com teor de 0,1 a 1,0% de Carbono e 11 a 18% de Cromo, caracterizados pela estrutura cristalina tetragonal e muito utilizados quando a aplicação requer boas propriedades de tração, fadiga, e fluência combinadas com elevada resistência à corrosão. São ferromagnéticos e possuem elevada resistência mecânica. Os aços **AISI 403, 416, 420, 422** são os mais comuns deste grupo.
- **Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação** – são ligas Ferro-Cromo (12-17%), Níquel (4-8%), Molibdênio(0-2%) contendo adições de elementos que permitem o endurecimento pela precipitação de compostos intermetálicos, como alumínio, cobre, nióbio e/ou titânio. Podem ter uma matriz austenítica ou martensítica.

As Figuras 3 e 4, representam a classificação dos aços inoxidáveis Ferríticos, Martensíticos e Austeníticos de acordo com a adição de elementos de liga nos mesmos.

Nas três figuras acima mostrando a classificação dos aços inoxidáveis podemos comentar a importante dependência dos elementos de liga, observando que pequenas mudanças de elementos e da porcentagem, vai mudar o tipo de aço inoxidável, com isso sua resistência à corrosão principalmente, como observado nas diferentes aplicações para os quais esses aços são fabricados.



mecânicas e boa soldabilidade. Além disso, combinam alto limite de resistência, alta taxa de encruamento e boa ductilidade, oferecendo assim ótimos aspectos para trabalho a frio. Outro ponto relevante, é que sua resistência mecânica pode ser aumentada através do encruamento devido à formação da martensita induzida por deformação, o que gera perda de ductilidade no material. Em geral, possuem excelentes propriedades criogênicas, não apresentam transição dúctil-frágil, e boa resistência mecânica em altas temperaturas (CARBÓ, 2008).

Em relação aos aços inoxidáveis austeníticos os mais conhecidos são os da série 300, como por exemplo, os aços AISI 301, 304 e 316. Por questão de custo, parte do níquel presente nesses materiais pode ser substituída por manganês ou nitrogênio que também são elementos estabilizadores da austenita, podendo formar outro sistema na família, a série 200. São exemplos os aços AISI 201, 202 e 204 (MACHADO, 2017).

São ligas ferrosas constituídas por Cr e Ni que apresentam estrutura austenítica, apresentando assim estrutura cúbica de faces centradas (CFC), tendo como principais características, o fato de não serem endurecíveis por tratamento térmico e apresentar elevada soldabilidade e resistência à corrosão, quando comparado com os Aços Inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Apresenta ainda, baixo limite de escoamento, elevada resistência mecânica ductilidade.

Além do Níquel, que é o principal elemento estabilizante da Austenita, outros elementos como o Manganês, Cobre, Carbono e Nitrogênio, também atuam neste sentido, sendo comumente adicionados a esta liga para esta finalidade. Sua composição de Cromo varia entre 16 a 26 % e a de Níquel entre 6 a 22 %. A composição química dos aços inoxidáveis austeníticos são criteriosamente balanceadas, buscando a minimização da precipitação de diferentes fases, principalmente a ferrita delta ( $\delta$ ), que tem grande efeito negativo na resistência a corrosão por pites, bem como reduz a capacidade de trabalho a quente do metal.

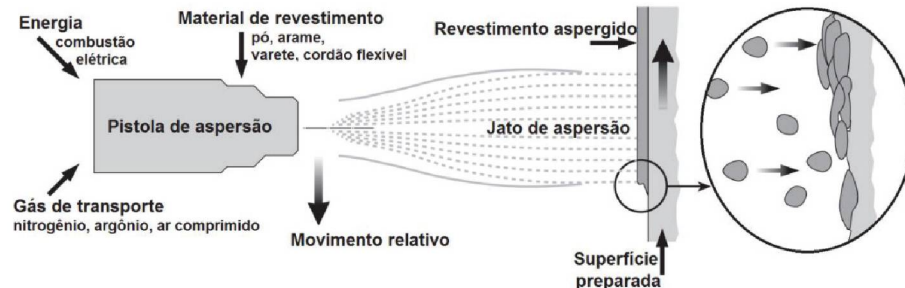
Ainda, quando utilizado para trabalho a quente, A exposição da fase ferrita delta ( $\delta$ ) durante um determinado período de tempo a temperaturas por volta de 400 °C leva à formação da fase sigma ( $\sigma$ ), que reduz a ductilidade, e a tenacidade, por possuírem elevada dureza, além de reduzir a resistência à corrosão em frestas e resistência à corrosão por pite (LIMA, 2011). A fase  $\sigma$  é o precipitado intermetálico mais danoso para os Aços Inoxidáveis Austeníticos (GUILHERME, 2016).

## 2.2 ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de aspensão térmica em linhas gerais, diz respeito a deposição de camadas de material metálico ou não metálico fundido sobre uma superfície previamente preparada. A fusão do material a ser depositado é obtida através da combustão de algum gás, arco elétrico ou plasma. Um gás de arraste sob pressão é responsável por transportar e acelerar estas partículas em direção ao substrato, devido ao efeito deste mesmo gás, estas partículas vão sendo resfriadas e muitas partículas atingem a superfície já em um estado semifundido ou plástico, com o choque essas partículas são aderidas ao metal de base formando uma camada lamelar.

A Figura 5 apresenta um esquema de um processo de deposição de revestimentos por aspersão térmica.

FIGURA 5 – PRINCÍPIO DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Sucharski (2016), adaptado de Metco (2016).

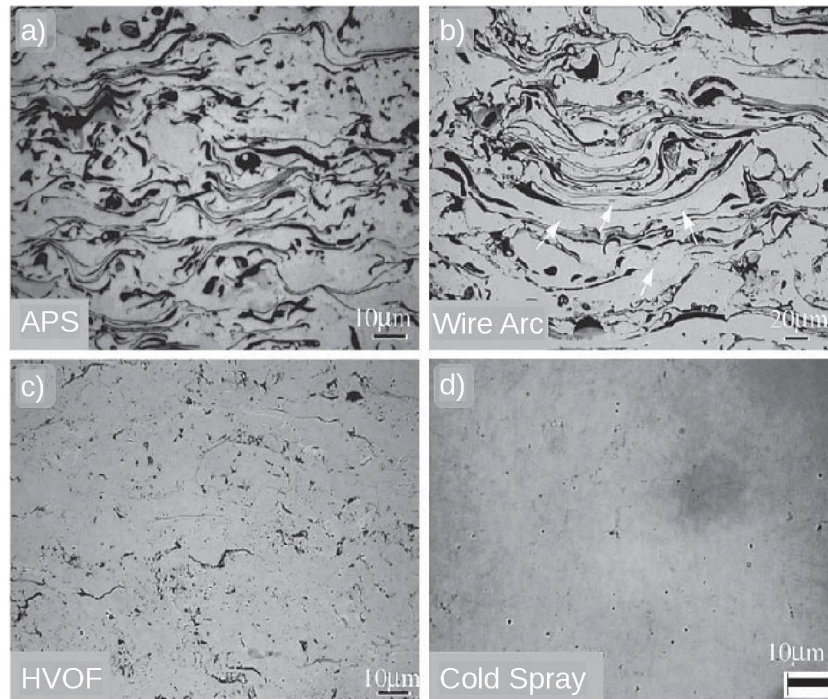
O revestimento é ancorado ao substrato principalmente pelo efeito mecânico e devido a rugosidade e limpeza do substrato, em função das altas velocidades atingidas pelas partículas e da deformação destas ao atingir o substrato, tendo um efeito menor as reações metalúrgicas e físicas, ao contrário dos processos de revestimento por soldagem. Por este motivo, o preparo do substrato é uma etapa importante para que se garanta uma boa adesão do revestimento, sendo que essa pode ser obtida através de processos de usinagem ou jateamento abrasivo, dentre outros, ainda, se faz necessária a eliminação de impurezas superficiais, como óxidos, óleo, graxa ou tintas. Pesquisa realizada por Paredes, Amico e D'Oliveira (2006), demonstra que para a deposição de Alumínio (Al) sobre um substrato de aço carbono, o grau de limpeza Sa3, com uma rugosidade média ( $R_y$ ) entre  $80 \mu\text{m}$  e  $100 \mu\text{m}$ , se mostraram condições ideais para a obtenção de um bom ancoramento do revestimento. Importante notar que a preparação da superfície pode variar em função do material do substrato, do material de revestimento, do processo de aspersão, mas que em linhas gerais, não foge muito dos parâmetros apresentados.

Todo este processo, visa a alteração das propriedades superficiais de uma determinada peça, buscando o aproveitamento das propriedades do material depositado, aumentando a resistência a corrosão e ao desgaste e melhorando as propriedades térmicas de um determinado componente. A deposição em superfícies cilíndricas, é normalmente aplicada com a Pistola de Aspersão estática com a peça realizando um movimento de rotação, já em superfícies planas, o substrato normalmente fica parado enquanto o movimento é realizado pela pistola em direções alternadas verticalmente e horizontalmente, de forma a garantir um perfeito cobertura de toda a superfície.

De forma geral, os revestimentos formados por aspersão térmica são constituídos por diferentes lamelas sobrepostas que não apresentam uma matriz contínua constituída inteiramente pelo metal de adição. Tipicamente são encontrados poros, óxidos e vazios, tendo a quantidade de cada um desses variando de acordo com o processo utilizado, conforme pode ser observado na Figura 6, onde estão apresentados os principais processos, sendo eles APS (Plasma Transferido), ASP (Arco Elétrico), HVOF (*High Velocity Oxi-Fuel*) e *Cold Spray*, todos se tratando da deposição

de  $Ni_5Al$  realizada por Sampath et al. (2004). Neste caso, observa-se uma redução expressiva da quantidade de óxidos (representada pela região mais escura), para os processos HVOF e *Cold Spray*.

FIGURA 6 – MORFOLOGIA DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS POR DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Sucharski (2016), Adaptado de Sampath et al. (2004).

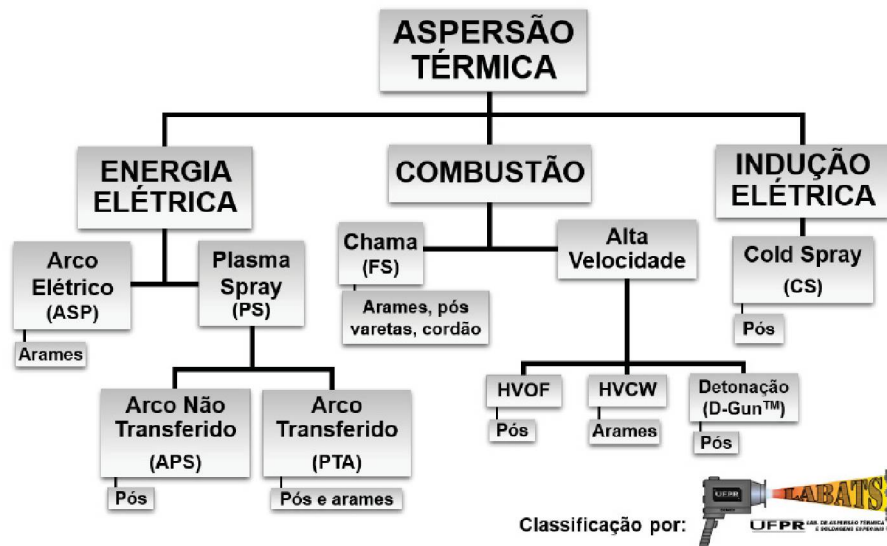
Os óxidos surgem devido a interação entre a atmosfera oxidante, e as partículas em elevadas temperaturas provenientes da pistola. A ocorrência de partículas não fundidas está mais relacionada aos processos por chama, já as partículas ressolidificadas ocorrem nos processos por arco elétrico, onde todo o material é fundido, porém são resfriados pelo gás de arraste até atingir o substrato. Os poros aparecem nas partículas aspergidas enquanto os vazios se formam devido a sobreposição de todas as outras falhas a medida que as camadas vão sendo depositadas.

Existem diferentes processos de aspersão térmica, bem como diversas formas possíveis de classificá-los, seja através dos consumíveis, do meio de transporte das partículas, entre outros.

A classificação apresentada a seguir, organizada pelo LABATS - Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais, divulgada por Sucharski (2012), que considera as diferentes fontes de aquecimento, sendo elas a energia elétrica, combustão de gases e a indução elétrica, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

Cada um dos processos de aspersão apresentam vantagens e desvantagens, determinadas de acordo com a aplicação onde o mesmo será utilizado. A Tabela 1, apresentada por Olivio (2016), mostra os principais processos e suas características.

FIGURA 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA DE ACORDO COM A FONTE DE ENERGIA



FONTE: Sucharski (2012).

TABELA 1 – DIFERENÇAS ENTRE OS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Característica	Processos					
	Chama Pó	Chama Arame	Arco Elétrico	Plasma	HVOF	Cold Spray
Vazão de Gases (m <sup>3</sup> /h)	11	71	71	4,2	28 a 57	300
Temperatura média (°C)	2200 a 3200	2200 a 3200	4000 a 6000	5500 a 14000	2700 a 3100	50 a 90
Atmosfera em torno da partícula	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	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	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
Velocidade de transferência (m/s)	30 a 150	100 a 250	100 a 250	800	400 a 1200	500 >1500
Aderência relativa (MPa)	4 a 20	4 a 20	10 a 36	15 a 70	>36	>20
Coesão interlamelar	Baixa	Média	Alta	Alta	Muito Alta	Muito Alta
Teor de óxidos (%)	0,4 a 10	0,4 a 10	2,5 a 15	0,5 a 1	0,2 a 5	<1
Teor de Poros (%)	5 a 15	5 a 15	2 a 15	1 a 7	<3	<1
Custo relativo (1 a 10)	3	3	1	5	5	7
Taxa de deposição máxima (kg/h)	7	9	16	5	14	6
Potência (kW)	25 a 75	50 a 100	4 a 6	30 a 80	100 a 270	18 a 50
Energia para Fusão (kW/kg)	11 a 22	11 a 22	0,2 a 0,4	12 a 22	22 a 200	-

FONTE: Olívio (2016).

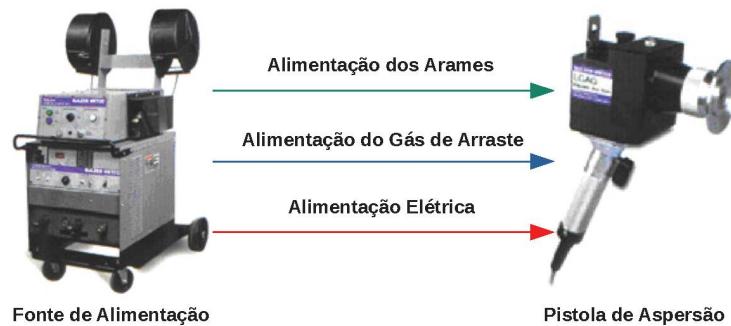
Analisando a tabela, é possível observar que dentre os processos, o por Arco Elétrico apresenta características intermediárias relativas a aderência do revestimento e coesão interlamelar extremamente interessantes, especialmente quando verificamos seu reduzido custo, frente aos processos que conseguem características mais interessantes. Ainda, fica evidente, que mesmo frente aos novos processos como HVOF e *Cold Spray*, que foram desenvolvidos mais recentemente, a taxa de deposição ainda continua superior a estes.

### 2.2.1 Aspersão Térmica por Arco Elétrico

O processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico ou *Arc Spray Process (ASP)* consiste na fusão do metal devido ao curto circuito formado entre os dois arames que são continuamente alimentados. O equipamento de aspersão térmica consiste em uma fonte de energia, responsável

por regular e entregar a corrente elétrica necessária para a fusão dos arames, que trabalha em conjunto com um alimentador de arame, que permite a regulagem da velocidade de alimentação. Neste equipamento ainda, é possível fazer a regulagem da pressão do gás de arraste, bem como controlar e acompanhar os parâmetros do processo durante a deposição. Esse equipamento trabalha em conjunto com a Pistola de Aspersão Térmica, onde ocorre atomização e o transporte do metal em direção ao substrato. Um esquema simplificado deste processo pode ser visualizado na Figura .

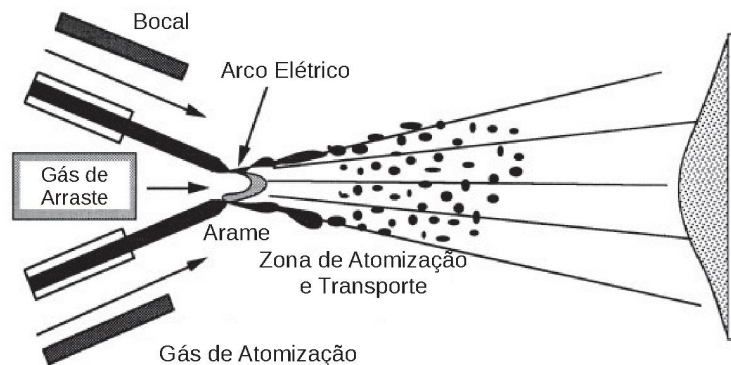
FIGURA 8 – ESQUEMA DOS EQUIPAMENTOS PARA ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Davis (2004).

O gás de arraste, geralmente ar-comprimado, em alta pressão transporta e fragmenta as partículas formadas durante a fusão e as projeta em forma de gotas em direção ao substrato, conforme pode ser observado no esquema apresentado na Figura 9. O gás de arraste para este processo pode ser ar comprimido ou um gás inerte sob alta pressão, conforme descrito por Davis (2004).

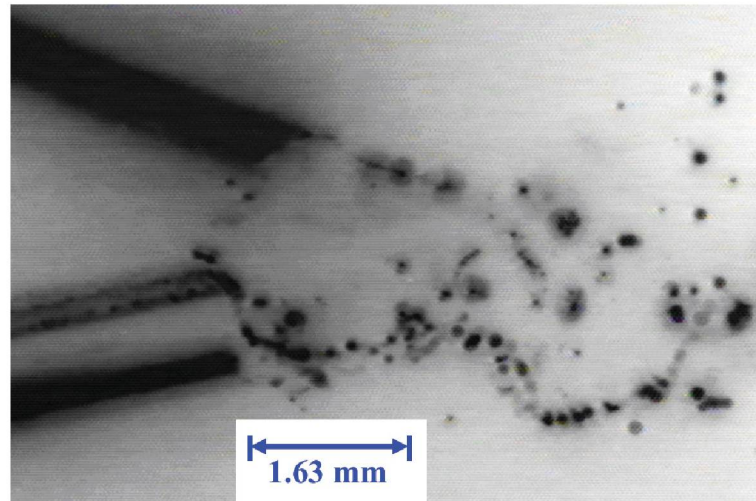
FIGURA 9 – ESQUEMA DO PROCESSO DE ASPERSÃO POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Davis (2004).

A formação e a fragmentação das partículas na Zona de Atomização, pode ser observada de maneira mais clara na Figura 10, onde é possível ver as partículas sendo destacadas do arame, apresentado por Abkenar (2007).

FIGURA 10 – FOTOGRAFIA DO MOMENTO EM QUE OCORRE O DESTACAMENTO DAS PARTÍCULAS NA PONTA DOS ARAMES



FONTE: Abkenar (2007).

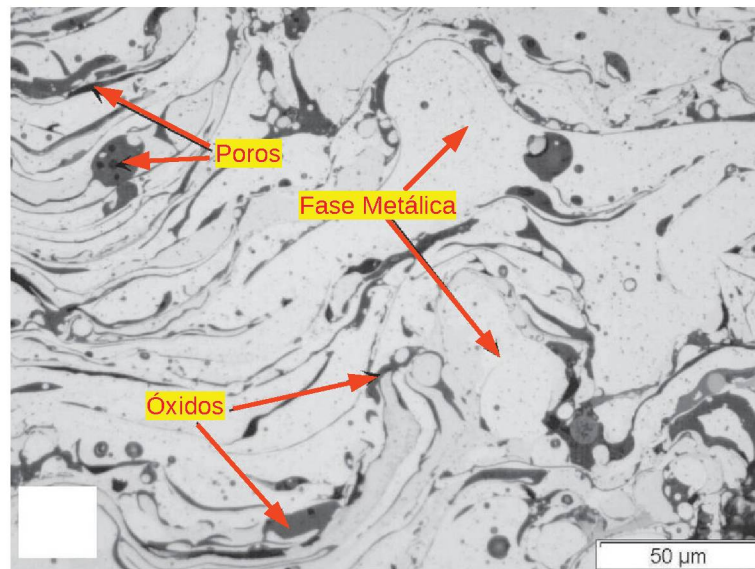
Devido ao fato dos arames serem fundidos diretamente pelo arco elétrico, a eficiência térmica do processo é bem mais elevada que os outros processos de aspersão térmica, porém, ao contrário dos outros processos, devido à ausência de uma chama, as partículas começam a ser resfriadas assim que elas saem da região do arco elétrico, o que pode aumentar a formação de óxidos em voo e reduzir a coesão entre as lamelas. No entanto, por esse motivo, o aquecimento do substrato também é conseqüentemente menor, permitindo a aplicação em substratos com baixo ponto de fusão, como os materiais poliméricos (DAVIS, 2004).

A Figura 11, representa de forma mais clara um revestimento típico depositado através do processo por Arco Elétrico, apresentando as principais características das lamelas para este processo. Neste caso, se trata de um revestimento de uma liga especial Fe-Mn-Cr-Si, desenvolvida pelo autor, depositado sobre um Aço Inoxidável ASTM A743-CA6NM.

Mesmo que a temperatura do substrato não sofra aquecimento elevado durante o processo de aplicação do revestimento, as interações das partículas sob elevadas temperaturas sobre o substrato e sobre as lamelas depositadas anteriormente, faz com que apareçam regiões com reações químicas e difusão, conferindo uma maior adesão e resistência ao produto final (MAZZER; AFONSO, 2012).

Em relação a outros processos de aspersão térmica, o por arco elétrico, apresenta ainda outras vantagens, como uma maior taxa de deposição, fácil operação, seja operando manualmente ou mesmo de maneira automatizada, baixo custo de confecção dos arames consumíveis, que inclusive podem ser utilizados os que são empregados em processos de soldagem, embora já exista arames preparados exclusivamente para o processo de aspersão térmica, níveis de aderência melhores que os do processo por chama, porém menores do que aqueles que apresentam maiores velocidades de partículas, como o HVOF e *Cold Spray* (OLIVIO, 2016).

FIGURA 11 – MICROESTRUTURA TÍPICA DE UM REVESTIMENTO APLICADO POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Pukasicwicz et al. (2012).

Em linhas gerais, o revestimento formado pelo processo por arco elétrico apresenta lamelas maiores e com formato mais variado se comparado com os outros processos, além de apresentar uma maior concentração de óxidos e a presença de partículas que foram solidificadas antes do impacto com o substrato (PUKASICWICZ et al., 2012). Os óxidos presentes no revestimento podem trazer problemas em função da redução da coesão entre lamela e também por serem mais frágeis que o restante do metal, levando a perda da ductilidade do revestimento, além de reduzir o teor de certos elementos de liga em função da oxidação destes (DESHPANDE; SAMPATH; ZHANG, 2006).

Porém, em alguns casos, a formação de óxidos pode levar a uma melhor resistência ao desgaste, a compressão e também a oxidação, como foi observado por Rodriguez et al. (2007), onde a resistência à corrosão em atmosfera salina de um revestimento de Alumínio foi maior quando o mesmo apresentou teores de óxidos entre 2,5% e 3%, sem observar uma redução na aderência do revestimento.

Quando existe a necessidade de redução do teor de óxidos no revestimento, algumas estratégias podem ser empregadas, como o uso de gás inerte, redução da distância de aplicação e utilização de bocais de alta velocidade, com o objetivo de reduzir a oxidação das partículas, seja diminuindo o tempo de voo ou retirando a atmosfera oxidante.

Por característica do processo, nos revestimentos formados por arco elétrico pode ocorrer a formação de óxidos encrustados, Newbery e Grant (2006), observaram que a grande maioria dos óxidos surge durante a fusão dos arames, sendo que para um arame rico em Ferro, ocorre a vaporização de elemento e a formação de finas partículas de  $Fe_3O_4$  que são então carregadas e depositadas no substrato. Os diferentes mecanismos e regiões de formação de óxidos serão abordados mais a frente.

### 2.2.2 Parâmetros que Influenciam o Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico

A influência do gás de arraste na formação das partículas foi estudada por Tillmann et al. (2014), que desenvolveu um método computacional para a otimização do formato do bocal, verificando a influência na velocidade e no comprimento do jato de alta velocidade no processo por arco elétrico, mostrando que além do controle da velocidade das partículas e de seu resfriamento, deve-se verificar a formação de partículas mais finas devido ao turbilhonamento, o que aumenta o percentual de óxido no revestimento.

Toma et al. (2013), também estudou a influência de diferentes bocais no revestimento e identificou que por mais que a pressão do gás de arraste tenha efeito na velocidade da partícula, o aumento desta nem sempre leva ao aumento da aderência, devido ao maior resfriamento das partículas. Em seu trabalho, ele concluiu que a grande influência no revestimento está na posição onde é formada a Zona de Alta Velocidade (ZAV), tendo um revestimento com maior oxidação, porosidade e presença de lamelas grandes com baixa aderência se posicionada após esta zona em função do resfriamento das partículas. Assim, a condição ideal foi aquela onde a ZAV se iniciou na região de formação do arco elétrico. Da mesma forma, Guerrero et al. (2006), desenvolveu um estudo no LABATS, obtendo resultados que corroboram com a verificação da grande influência do bocal na porosidade e teor de óxidos no revestimento depositado, bem como a modificação da região de transferência da pistola.

Horner, Hall e McCloskey (2015), faz um estudo a respeito das influências dos parâmetros do processo com o padrão formado pelo processo de aspersão, evidenciando que o a pressão do gás de arraste possui um efeito maior na dispersão do spray, em função da velocidade do gás e da turbulência gerada na ponta do arame que forma um turbilhonamento no momento em que ocorre o destacamento das gotas. Em seus resultados, a melhor condição em relação a taxa de deposição foi com o uso de uma elevada pressão do gás de arraste e uma elevada corrente.

Da mesma forma, Newbery, Grant e Neiser (2005), correlacionou em seu trabalho o efeito dos parâmetros com a velocidade e a temperatura das partículas aspergidas, confirmando que o efeito do aumento do gás de arraste sobre a velocidade e o resfriamento das partículas. Sendo que as partículas possuem uma taxa de resfriamento de aproximadamente  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$  e aproximadamente  $10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  com velocidade média de  $100\text{ mm}/\text{s}$ . Em seus resultados, ao utilizar como gás de arraste o Nitrogênio, os autores observaram uma redução de cerca de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  em relação ao ar comprimido, onde as partículas atingiram a temperatura de pico de  $2335\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

No que diz respeito à influência da temperatura das partículas, Toma (2013) estudou o efeito do aquecimento do gás de arraste por meio de um bocal de combustão secundário, montado logo após a região onde ocorre a formação do arco elétrico. Neste trabalho, o autor observou que ao manter a temperatura da chama acima de  $1000\text{ K}$  para uma distância de aspersão de  $150\text{ mm}$ , houve um substancial aumento da aderência e uma diminuição da percentual de óxidos

do revestimento, o resultado foi especialmente interessante para aplicações sobre superfícies cilíndricas, situação comumente encontrada na indústria.

Assim como nos processos de soldagem, onde existe a possibilidade de utilização de Eletrodos Revestidos, eles também são aplicáveis nos processos de aspersão por arco elétrico, sendo especialmente interessantes por permitirem a adição de elementos de liga como o Cromo e o Níquel, dentre outros, que garantem uma maior resistência ao desgaste, mas principalmente, uma maior resistência à corrosão.

He et al. (2014) e Wielage et al. (2013) trabalharam com arames especiais com diferentes elementos de liga, sendo para o primeiro com Ferro, Níquel, Cromo e Titânio e Ferro, Cromo, Boro e Alumínio para o segundo. Ambos os trabalhos apresentam uma melhora significativa na resistência ao desgaste e resistência à corrosão, especialmente a quente para o segundo, que obteve resultados satisfatórios em temperaturas entre 300 e 600 °C.

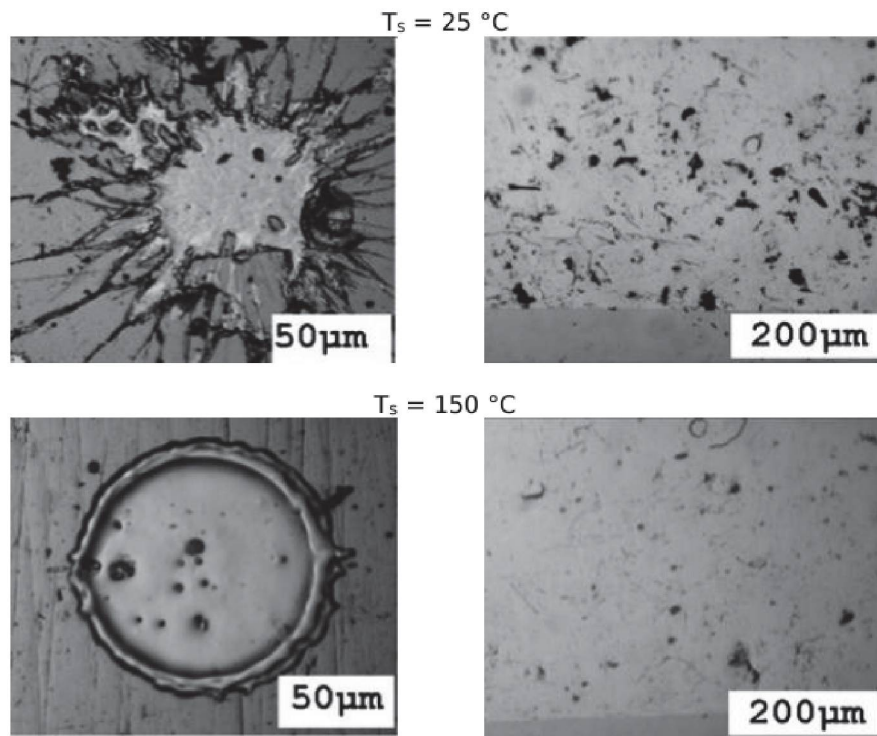
Além do controle dos parâmetros ligados diretamente ao equipamento, como a tensão, corrente, pressão do gás de arraste e distância da pistola em relação ao substrato, que como visto anteriormente, pode influenciar na qualidade do revestimento, outro parâmetro que também tem grande influência na adesão e na formação de óxidos e poros é a temperatura do substrato.

Ao aumentar a temperatura do substrato, ocorre uma mudança no mecanismo de espalhamento das partículas aspergidas. Devido a alta velocidade das partículas, quando estas se chocam com o substrato ocorre uma deformação que espalha o material sobre a superfície. Com temperaturas mais baixas, ocorre um espalhamento irregular e formação de respingos, provenientes da fragmentação destas partículas durante o impacto, que após a sobreposição das camadas, acabam por formar vazios que aparecem na forma de porosidade, reduzindo a adesão do revestimento. Com temperaturas mais elevadas, a deformação das partículas é facilitada, formando discos que promovem um revestimento mais regular, como menor índice de porosidade (VAZ, 2013) e (VAZ et al., 2020). A Figura 12 demonstra a diferença entre duas gotas aspergidas com o substrato em diferentes temperaturas.

Ao alterar a temperatura do substrato, além do efeito de melhor ancoramento, também pode ocorrer a difusão de elementos químicos entre as lamelas e o substrato. Silva e Paredes (2016) observaram que ao aumentar a temperatura do substrato, ocorre um refinamento da microestrutura austeno-ferrítica e uma variação na relação de Cromo e Níquel equivalentes, demonstrando que houve uma interação maior entre o substrato e a camada depositada em um revestimento de Aço Inoxidável Duplex.

Neste sentido, importante ressaltar o que foi observado por Tran et al. (2011), onde o autor reitera os efeitos positivos do aumento da temperatura do substrato na morfologia das lamelas e no ancoramento do revestimento, porém, o autor observa também que a deposição deve ocorrer imediatamente após o tratamento térmico, pois em contato com o ar atmosférico ocorrerá a reidratação dos óxidos presentes na superfície do substrato, que irá ocasionar na formação de uma fina camada de vapores de água, que impedem o perfeito contato das lamelas com o substrato, tendo um efeito negativo no ancoramento do revestimento.

FIGURA 12 – TIPOS DE LAMELAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO



FONTE: Adaptado de Abedini et al. (2006).

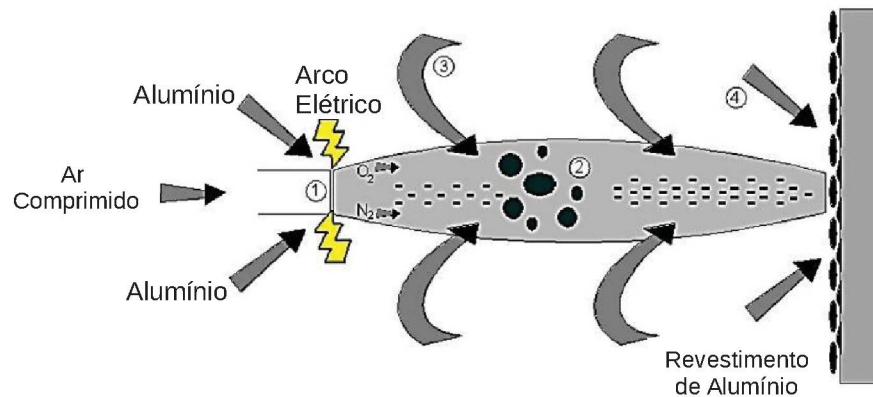
### 2.2.3 Fontes de Oxidação no Processão de Aspersão Térmica

A oxidação nos revestimentos aspergidos se mostra como um grande desafio, pois além de levar a uma redução da resistência e aderência do revestimento, podem também influenciar a composição química das panquecas, devido a redução de elementos de ligas que deveriam estar presentes na microestrutura do material e estarão incrustados na forma de óxidos. Esse fenômeno influencia diretamente na resistência a oxidação, principalmente em materiais que forma camadas passivadoras, como os Aços Inoxidáveis.

Rodriguez et al. (2007) identificou para a aspersão térmica de Alumínio pelo processo de Arco Elétrico os diferentes locais e mecanismos de formação das partículas oxidadas que são encontradas nos revestimentos. A Figura 13 mostra um esquema que descreve a localização destes pontos.

O primeiro mecanismo ocorre logo na zona de formação do arco elétrico, onde o metal fundido atinge temperaturas altíssimas, muitas vezes superiores à temperatura de vaporização, facilitando a oxidação pelo contato com o gás de arraste. Nesta região, devido as altíssimas temperaturas resultantes do arco elétrico formado entre os arames, ocorre a dissociação instantânea do Ar Atmosférico em Nitrogênio ( $N_2$ ) e Oxigênio Atômico ( $O_2$ ), que possui uma altíssima reatividade e alta velocidade, que forma filmes ou inclusões de óxidos nas partículas que estão altamente aquecidas (DESHPANDE; SAMPATH; ZHANG, 2006).

FIGURA 13 – FONTES DE OXIDAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Rodriguez (2003).

O segundo mecanismo se dá devido à reação de oxidação das partículas que estão sendo resfriadas, mas que ainda possuem uma elevada temperatura, com o gás de arraste, esta região é complementada com o terceiro mecanismo, que se dá pela influência do ar atmosférico, esta região deve ser considerada separadamente, pois quando se utiliza gases inertes como gás de arraste este mecanismo acaba por ter grande influência sobre o segundo, o que não irá ocorrer com o uso de ar comprimido, onde o segundo mecanismo se torna uma fonte muito mais problemática (SILVA, 2016).

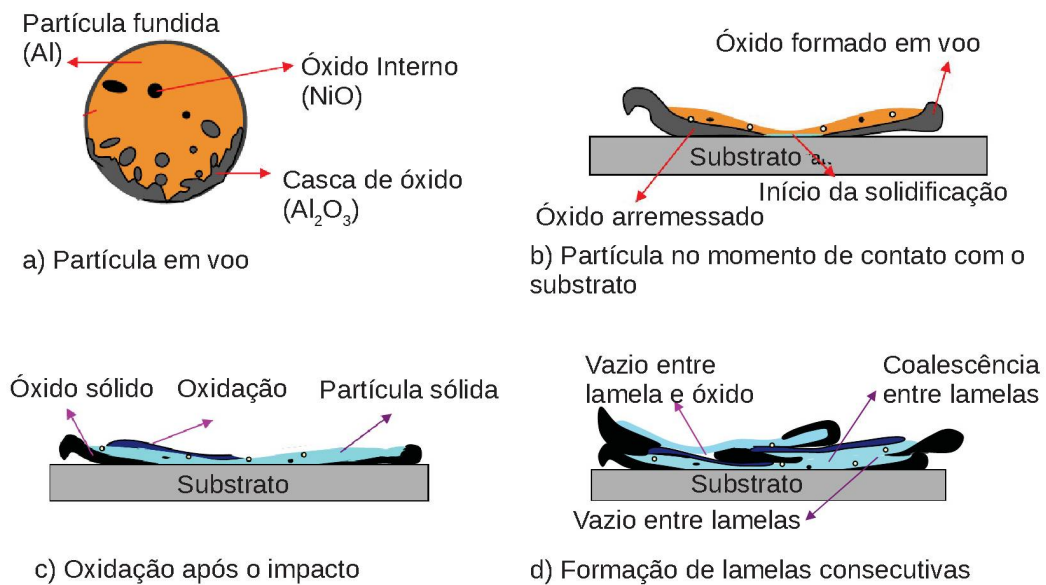
Por último, temos o quarto mecanismo de oxidação, que ocorre devido a interação do gás de arraste sobre as camadas já revestidas. Para o processo por arco elétrico, as temperaturas do substrato e das camadas aspergidas não são muito elevadas se comparadas aos processos por chama, tornando a formação de óxidos por esse mecanismo menos crítica se comparada ao segundo e terceiro mecanismos (TOMA, 2013).

Em seu trabalho, Deshpande, Sampath e Zhang (2006) identificou ainda que quando em voo, podem aparecer duas diferentes formas de oxidação, sendo elas os óxidos que envolvem a partícula como uma casca e aqueles que são internos a esta, conforme pode ser visualizado na Figura 14a. Os estudos foram conduzidos para o processo de Aspersão por Arco Elétrico com a deposição da liga Ni(5%)Al, devido a natureza dos seus componentes, que como é o caso do Aço Inoxidável, formam camada passiva.

No momento imediatamente após o impacto da partícula no substrato, ocorre o arremesso da película de óxido que envolvia a partícula em voo, devido a elevada taxa de resfriamento em função do gradiente de temperatura entre o substrato e a partícula, ocorre o resfriamento dessa camada de óxido e da partícula que está em contato com o substrato, conforme observado na Figura 14b. Em função do efeito do resfriamento causado pelo jato de ar do gás de arraste, a partícula é resfriada e em sua superfície também é formada uma camada de óxido, conforme o esquema da Figura 14c.

Tendo em vista o processo de composição do revestimento, no momento em que ocorre o empilhamento de novas lamelas sobre as anteriores, surgem vazios entre estas em função

FIGURA 14 – MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS ÓXIDOS NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Deshpande, Sampath e Zhang (2006).

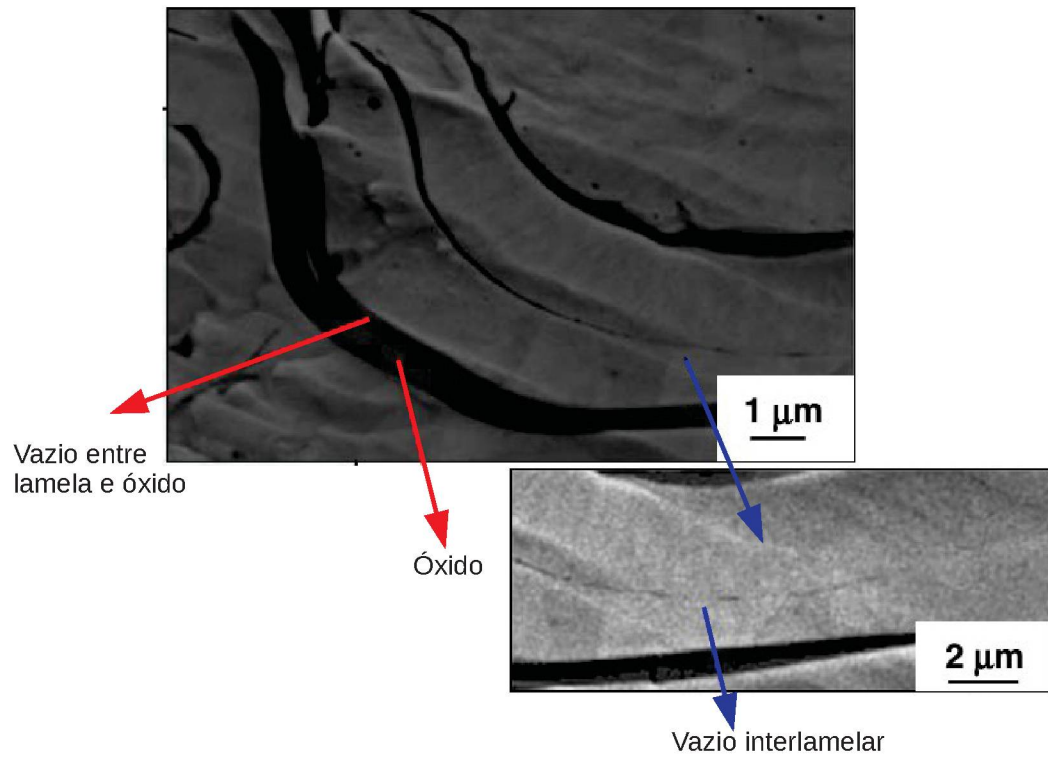
da presença das camadas de óxido, que devido as suas propriedades mecânicas e químicas, podem impedir a perfeita coesão das camadas, formando vazios em regiões de interface de óxidos e lamela metálica. Esses vazios podem ocorrer também entre as lamelas, em função das altas taxas de resfriamento, mas ocorrem em menor escala se comparada com o caso anterior, prevalecendo a coalescência entre as lamelas, de acordo com o observado na Figura 14d.

A Figura 15, apresenta através de uma imagem obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura as regiões onde existe a formação dos vazios entre as lamelas e óxidos, bem como a região onde ocorre o vazio interlamelar.

Ainda, conforme apresentado na Figura 16, durante o processo de aspersão existem partículas que se ressolidificam em voo, essas não se espalham e formam regiões circulares no revestimento, onde é possível observar a casca de óxidos que a envolve. Essa característica é bastante observada nos revestimentos formados por Arco Elétrico, onde as elevadas temperaturas atingidas pela partícula, atrelada ao efeito de resfriamento causado pelo gás de arraste levam a formação dessas partículas ressolidificadas.

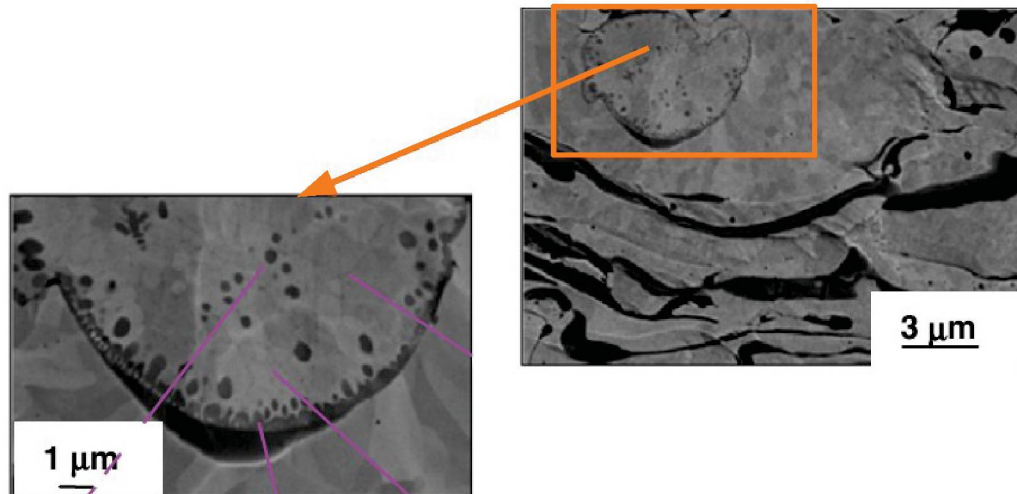
De acordo com Deshpande, Sampath e Zhang (2006) e Pukasiewicz (2008), a coalescência entre as lamelas está diretamente ligada na qualidade final do revestimento, principalmente no que diz respeito às propriedades mecânicas do revestimento. Por esses resultados, percebe-se que a quantidade de óxidos no revestimento afeta de maneira significativa a molhabilidade das partículas. Processo que apresentam uma maior velocidade das partículas, como é o caso do HVOF, tendem a não formar óxidos em casca na partículas apresentando segundo Deshpande,

FIGURA 15 – ÓXIDOS E VAZIOS FORMADOS NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Deshpande, Sampath e Zhang (2006).

FIGURA 16 – PARTÍCULA RESSOLIDIFICADA COM CASCA DE ÓXIDOS



FONTE: Deshpande, Sampath e Zhang (2006).

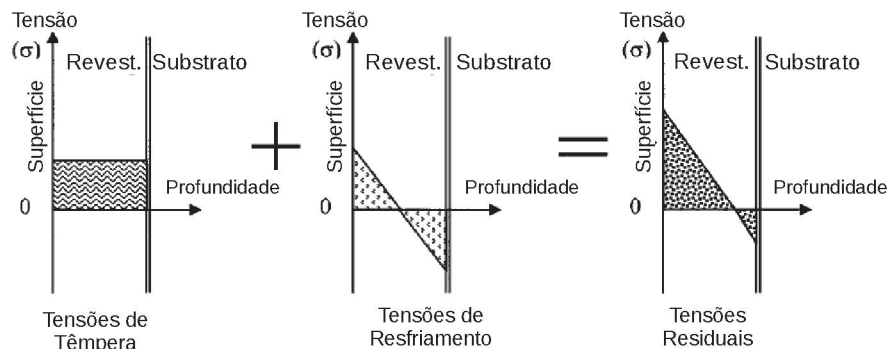
Sampath e Zhang (2006) uma maior molhabilidade e consequente coesão entre as lamelas, resultando em uma baixíssima porosidade e elevada aderência.

## 2.2.4 Tensão Residual dos Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica

Tensões residuais podem aparecer em qualquer tipo de revestimento aplicado através dos processos de Aspersão Térmica, devido ao ciclo de aquecimento e resfriamento do substrato e do revestimento. Essas tensões representam um fator importantíssimo no que diz respeito a aderência do revestimento, mas também no desempenho final da peça aspergida (SAMPATH et al., 2004).

O estado de tensão de um revestimento depositado por aspersão térmica possui duas principais fontes, sendo aquela causada por um estágio de "têmpera" e posteriormente pelo processo de resfriamento. No primeiro estágio de deposição, as partículas semi-fundidas atingem o substrato, aquecendo-o e então se solidificam, porém, não ocorre uma contração total da partícula, devido ao resfriamento rápido, pelo qual elas sofrem, além de sofrer influência do impacto das partículas subsequentes, este fenômeno é reconhecido como tensões de têmpera. No segundo estágio, ocorre o resfriamento do revestimento, a tensão residual de resfriamento se dá devido as diferentes taxas de expansão e contração térmica e de temperatura entre o revestimento e o substrato (ARAUJO et al., 2005). A soma dessas duas tensões leva a tensão residual do processo, conforme está esquematizado na Figura 17.

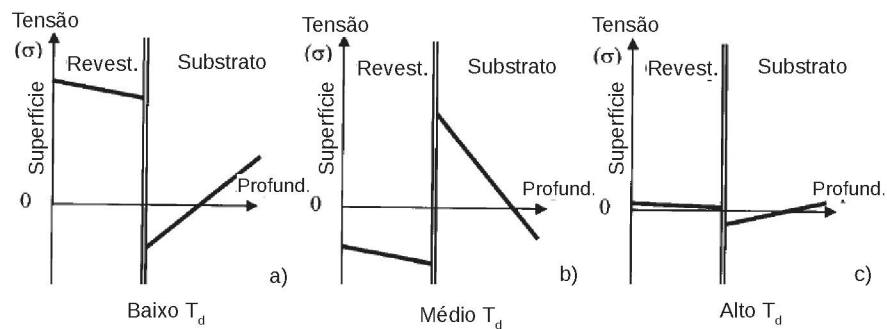
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TENSÃO RESIDUAL EM UM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Adaptado de Araujo et al. (2005).

Diversos fatores podem afetar na formação de tensões residuais no revestimento, como a espessura do revestimento depositado, bem como em função do processo de deposição utilizado, nesse sentido, Matejcek et al. (2003), estudou os efeitos da temperatura de deposição, da energia cinética das partículas e da espessura entre passes, observando que os dois últimos fatores influenciam significativamente na formação das tensões de têmpera, já no caso da temperatura de deposição, a influência é muito mais significativa nas tensões de resfriamento em função da redução do gradiente térmico entre o substrato e o revestimento. A Figura 18 exemplifica bem este fato, onde uma maior temperatura de deposição resultou em uma menor tensão residual.

FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO DA TEMPERATURA DE DEPOSIÇÃO NA TENSÃO RESIDUAL EM UM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Adaptado de Araujo et al. (2005).

Diversos estudos vêm sendo conduzidos no intuito de identificar quais os principais fatores que influenciam na tensão residual assim, indicar quais os parâmetros ideais de deposição para mitigar seus efeitos. O que fica claro, de acordo com os estudos já conduzidos é que tensões residuais de natureza compressiva na superfície dos revestimentos garante uma melhor resistência a fadiga, ainda, no que diz respeito a aderência do revestimento ao substrato se dá quando a tensão residual na região de interface entre o substrato e o revestimento é a menor possível (GODOY et al., 2002), (CLYNE; GILL, 1996).

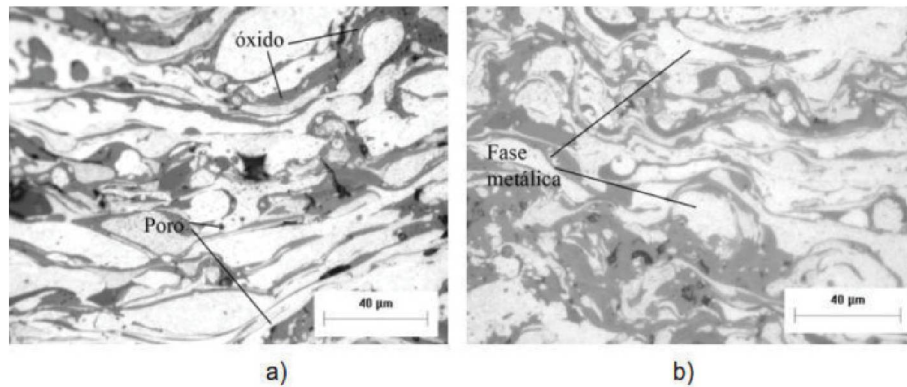
Diferentes estudos demonstram que a temperatura de deposição possui grande influência no controle da tensão residual, garantindo assim uma boa aderência ao substrato, assim como já foi apresentado acima, os trabalhos desenvolvidos por Teixeira et al. (1999) e Qian, Nakamura e Berndt (1998) também apresentam resultados interessantes em diferentes materiais e aplicações.

### 2.2.5 Aspersão Térmica de Aços Inoxidáveis

Em seu trabalho, Guerrero et al. (2006), conduziu um estudo referente aos efeitos da geometria do bocal da pistola de aspersão térmica por arco elétrico na microestrutura final do revestimento, neste trabalho, o metal de deposição utilizado foi o aço inoxidável 309L, o mesmo que será utilizado neste trabalho. Dentre os resultados apresentados, interessante destacar as análises micrográficas do revestimento, onde foram destacadas as regiões de porosidades (pontos pretos), os óxidos (correspondendo as regiões cinza escuro), conforme observado na Figura 19. Em seu trabalho, Santos (2016) obteve de forma semelhante, as mesmas regiões para o mesmo material analisado, com grande similaridade entre as microestruturas.

Da mesma forma, o trabalho desenvolvido por Zeng, Sakoda e Tajiri (2006), também analisou um revestimento de aço inoxidável austenítico depositado via aspersão térmica por arco elétrico sobre aço macio. Neste caso, foram obtidas imagens através da técnica de Microscopia Eletrônica por Varredura - MEV. Novamente, conforme a Figura 20, as regiões mais escuras das imagens foram consideradas como sendo óxidos, enquanto as regiões mais claras como

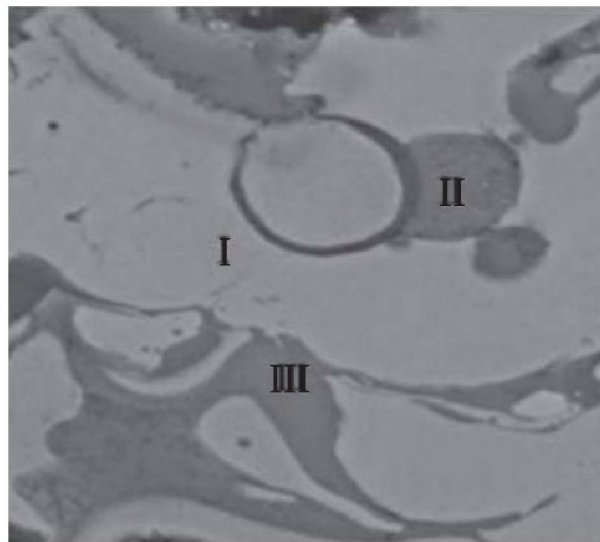
FIGURA 19 – MICROESTRUTURA DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 309L DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Guerrero et al. (2006).

sendo a fase metálica. Estas considerações foram então confirmadas através da análise por Espectroscopia por Energia Dispersiva - EDS, em três regiões de diferentes características metalográficas.

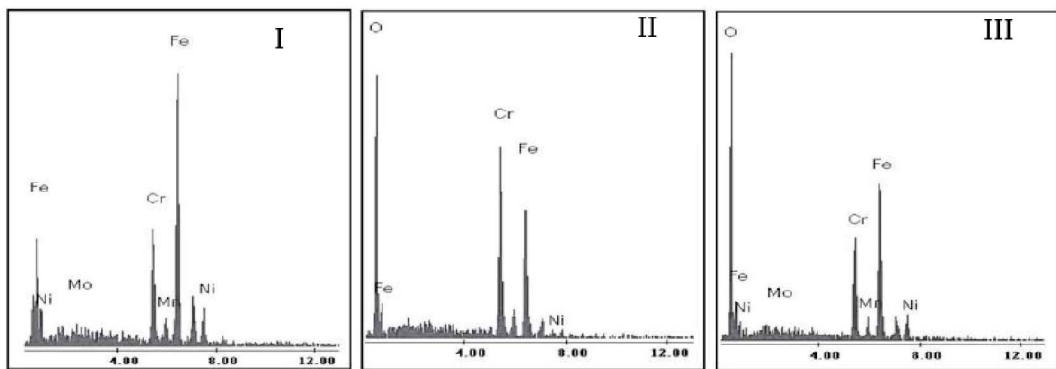
FIGURA 20 – MICROESTRUTURA DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Zeng, Sakoda e Tajiri (2006).

Na Figura 21, é apresentada o resultado da análise por EDS, onde é possível observar uma elevada concentração de Oxigênio nas regiões cinza escuras, evidenciando a presença de óxidos. Interessante observar que existe uma diferença entre as regiões II e III, onde esta última apresenta uma concentração grande de Oxigênio e Ferro, evidenciando a presença de Óxido de Ferro, e na região II, observa-se maior concentração de Oxigênio e Cromo, evidenciando a presença de Óxido de Cromo.

FIGURA 21 – ANÁLISE POR EDS DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



FONTE: Zeng, Sakoda e Tajiri (2006).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os diferentes materiais, metodologias e procedimentos utilizados e desenvolvidos para a execução desta dissertação.

#### 3.1 ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO

Nesta seção serão apresentadas os materiais e a metodologia utilizada durante o processo de aspersão térmica.

##### 3.1.1 Preparo dos Corpos de Prova

Anteriormente ao processo de aspersão, se faz necessário o preparo da superfície a ser revestida, sendo realizada a limpeza e regularização da superfície através do jateamento abrasivo, obtendo um padrão de limpeza Sa3 de acordo com a norma NACE RMN - 01/70, este processo é importante para garantir uma perfeita adesão do revestimento ao substrato.

Após o jateamento, a rugosidade foi avaliada com o auxílio do Rugosímetro MITUTOYO SJ-201.

##### 3.1.2 Revestimento por Aspersão Térmica

A deposição foi realizada através do processo por Arco Elétrico modificado, utilizando o equipamento modelo Value Arc 300E, fabricado pela Sulzer Metco em conjunto com a pistola Electric Arc Gun LCAG do mesmo fabricante, com um aquecedor acoplado a pistola, que será detalhado logo abaixo.

Como metal de deposição, foi utilizado o arame tubular de Aço Inoxidável AISI 309L de baixo teor de carbono com bitola de 1,6 mm, depositado sobre um substrato de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304. Estes materiais foram escolhidos devido ao fato de serem uma combinação usualmente encontrada em campo, por exemplo, no reparo de superfícies de pás de bombas que sofreram a perda de material por cavitação.

Os parâmetros de deposição utilizados neste trabalho foram definidos através de um ensaio piloto, onde buscou-se definir a melhor correlação entre a pressão do gás de arraste, a temperatura obtida no aquecimento do ar e a aderência do revestimento, sendo esta medida através de ensaio de dobramento, conforme a norma PETROBRAS N 2568/B (PETROBRAS, 2011). Ao final desta etapa, foram definidos os parâmetros apresentados na tabela abaixo.

O revestimento foi aplicado com deposição em malha, num total de 3 passes, obtendo uma espessura do revestimento entre 250 e 300  $\mu\text{m}$ .

TABELA 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Corrente (A)	200
Tensão (V)	34
Distância (mm)	200
Pressão do Gás de Arraste (psi)	45

FONTE: O Autor (2020).

### 3.1.3 Pré-Aquecimento do Substrato

Usualmente, o pré-aquecimento do substrato é feito através de uma tocha usando como combustível o gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), porém, devido a instalação dos termopares e a possibilidade de danificar os cabos que conectam os mesmos, optou-se por fazer o aquecimento em um forno elétrico. Neste caso, os corpos de prova foram colocados e deixados dentro do forno até que a temperatura fosse homogeneizada por volta de 160 °C, e então os corpos de prova foram levados rapidamente ao suporte, assim que a temperatura atingia 120 °C, o processo de deposição era então iniciado. Buscou-se reduzir o período de espera o máximo possível, de forma a evitar a oxidação da superfície do substrato (TRAN et al., 2011).

Para os corpos de prova utilizados no ensaio de aderência, o pré-aquecimento foi realizado de maneira convencional, através de uma tocha de GLP, obtendo a temperatura de pré-aquecimento de 120 °C.

Em ambos os casos, a temperatura foi obtida através de um Pirômetro de Radiação.

## 3.2 AQUECIMENTO DO GÁS DE ARRASTE E AQUISIÇÃO DE DADOS

Nesta seção serão apresentados os equipamentos desenvolvidos para a execução deste trabalho de dissertação.

### 3.2.1 Equipamento para Aquecimento do Gás de Arraste

O equipamento para o aquecimento do gás de arraste construído para este trabalho é composto por uma resistência elétrica do tipo cruzeta cerâmica, que é costumeiramente utilizada em sopradores térmicos para a indústria de plásticos e termoformagem. A resistência utilizada neste projeto possui uma potência nominal de 2500 W a uma tensão de 220 V, sendo capaz de manter de maneira estável a temperatura acima de 100 graus para uma pressão de 45 psi, ideal para os estudos propostos neste trabalho, sendo ainda compatível com a pistola disponível no laboratório. A Figura 22 mostra o modelo de resistência elétrica do tipo cruzeta cerâmica utilizada neste projeto.

Para o corpo do equipamento foram utilizados tubos e conexões em aço galvanizado, devido a maior facilidade de construção, reduzido custo de aquisição destes materiais, além

FIGURA