

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE E CORROSÃO DOS AÇOS  
INOXIDÁVEIS AISI 316L E AISI 420 DEPOSITADOS PELO PROCESSO DE  
ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO**



i

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**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 SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PAULO ROGÉRIO DE CARVALHO**

**RECIFE, 09 DE MARÇO DE 2007.**

**C331e**      **Carvalho, Paulo Rogério 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 / Paulo Rogério de Carvalho. – Recife: O Autor, 2007.

xiv, 89 folhas.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

Inclui Referências bibliográficas e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Aspersão Térmica. 3. Corrosão. 4. Aço Inoxidável. I. Título.

**621 CDD (22.ed.)**

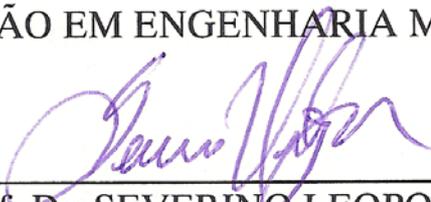
**UFPE/BCTG/2008-025**

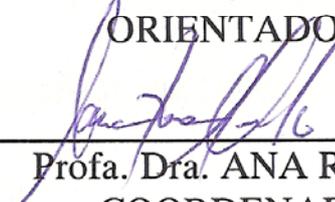
“ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE E CORROSÃO DO AÇO  
INOXIDÁVEL AISI 316L E AISI 420 DEPOSITADOS PELO PROCESSO DE  
ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO”.

PAULO ROGÉRIO DE CARVALHO

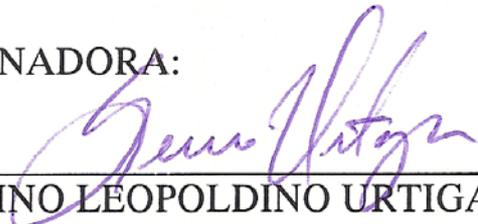
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

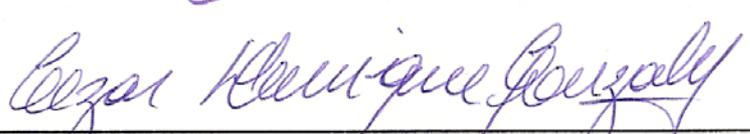
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

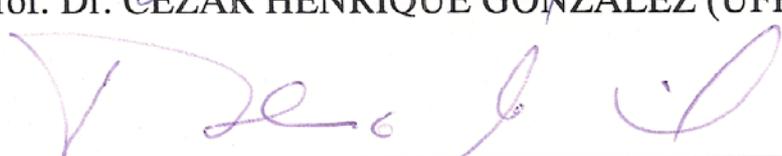
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO  
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. CÉZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. THEOPHILO MOURA MACIEL (UFCG)

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE E CORROSÃO DOS AÇOS  
INOXIDÁVEIS AISI 316L E AISI 420 DEPOSITADOS PELO PROCESSO DE  
ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO**

PAULO ROGÉRIO DE CARVALHO

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO**

ORIENTADOR: PROF. DR. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO

RECIFE, 09 DE MARÇO DE 2007.

**A Deus.**

**“Os grandes navegadores devem sua reputação às grandes tempestades”**

**Epicuro (341 - 270 a.C.), filósofo grego.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, por tudo.

Aos meus pais, João de Carvalho Filho e Amara Luzia de Lima Carvalho, pelo começo, amor e dedicação.

Aos meus irmãos, Fábio e Guilherme, pela amizade e incentivo.

À minha noiva, Roberta Ribeiro, pela força, confiança e cooperação.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Severino Leopoldino Urtiga Filho, pela paciência, colaboração e dedicação; e demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Aos colegas do laboratório de Materiais Compósitos, em especial Alexandre Araújo, Amilton Lins, Diniz Lima, Francisco Sinderlan e Sérgio Albuquerque do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas Cidrack Silveira, Prof<sup>o</sup> Dário Ferraz, Ivson Siqueira e Prof<sup>o</sup> Tiago Rolim do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pela ajuda na confecção e execução dos equipamentos e ensaios.

Aos colegas do laboratório de Eletroquímica, em especial Gilson Ferreira, Gilvaldo Gentil e Prof<sup>o</sup> Flamarion Borges Diniz do Departamento de Química Fundamental da UFPE, que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pela oportunidade de cursar o mestrado.

A Eliane Alves e Rose Lima, pelo apoio.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pela concessão da bolsa de mestrado.

A FINEP/CTPETRO e Petrobrás pelo suporte financeiro dos experimentos, através da REMULT, Rede 08/04 projeto FADE-FINEP 22.01.0762.00.

A Metaliza, especialmente Caio Máximo, e funcionários pelo apoio na execução dos revestimentos.

## RESUMO

Os componentes mecânicos em serviço apresentam comportamento que é uma conseqüência extremamente dependente da qualidade de sua superfície, da área de contato entre superfícies e do ambiente sob o qual os componentes são aplicados. Em particular, a corrosão e o desgaste, danificam direta e indiretamente a superfície dos componentes mecânicos, que se reverte em elevados custos de produção e de manutenção de sistemas mecânicos devido às paradas de equipamentos para reparo ou substituição de componentes, que chega a atingir aproximadamente 4,2% do produto interno bruto nos países industrializados.

Para eliminar ou minimizar os efeitos da corrosão e do desgaste, os componentes são submetidos a tratamentos superficiais. Os processos de revestimentos metálicos de materiais que apresentam propriedades superiores às do material de base se mostram eficientes em aplicações industriais e na proteção de superfícies metálicas em ambientes agressivos.

A técnica de aspersão térmica oferece a possibilidade de se revestir materiais de construção mecânica tais como aços comuns ao carbono com outros metais e ligas, objetivando protegê-los contra a corrosão e também ao desgaste.

Dentro deste contexto, o presente trabalho de dissertação tem como objetivo analisar e comparar o desempenho de revestimentos metálicos aplicados industrialmente por aspersão térmica. Neste estudo são analisados revestimentos a base dos aços inoxidáveis austenítico AISI 316L, do martensítico AISI 420 e a mistura desses aços, quanto às suas resistências ao desgaste e a corrosão. No caso da mistura destes revestimentos alia-se a maior proteção contra corrosão do revestimento AISI 316L à maior resistência ao desgaste por abrasão do revestimento AISI 420. Foi efetuado tratamento térmico para a mistura dos revestimentos AISI 316L e AISI 420 e observação da influência e efeito deste sobre as propriedades investigadas para cada liga.

Os revestimentos foram aplicados pelo processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico (Arc Spray) e são analisadas as propriedades de micro-dureza, de resistência a corrosão e ao desgaste. Para os ensaios de resistência ao desgaste foi proposto e construído um abrasômetro do tipo pino sobre disco, que consiste em um método de avaliação eficiente. As análises de corrosão foram baseadas nas técnicas eletroquímicas, em meio cloreto.

As características microestrutural, mecânica e química dos revestimentos foram analisadas através de testes específicos para cada uma das propriedades desejadas. Utilizou-se microscopia ótica e eletrônica de varredura para caracterizar o revestimento aplicado e a técnica de difração de raios-X na identificação dos constituintes do revestimento.

Nos resultados obtidos, para todos os revestimentos aplicados, analisou-se a eficiência dos revestimentos aplicados quanto ao aumento da resistência ao

desgaste e à corrosão das superfícies revestidas, à dureza do revestimento e porosidade. O efeito dos tratamentos térmicos aplicados aos revestimentos resultou em um acentuado aumento de todas as propriedades avaliadas, quando comparado com o revestimento sem tratamento térmico.

Através dos resultados obtidos foi evidenciado que o processo de aspersão térmica a arco elétrico, com os parâmetros definidos, apresentou um resultado satisfatório para a utilização dos arames AISI 316L e AISI 420, bem como a mistura destes dois aços, como revestimento de superfícies de aço baixo carbono.

Palavras-chave: Aspersão térmica, corrosão, aço inoxidável.

## ABSTRACT

Mechanical components behavior in service, are extremely dependent on the surface quality, the contact between areas and the environment where they are applied. Particularly, corrosion and wear damage, directly and indirectly, mechanical components surface that result in rise production and maintenance cost due to no programmed equipments stops to repair or parts substitutions. In industrial countries, these costs represent approximately 4.2% of internal product.

To prevent or eliminate corrosion and wear effects, surface treatments are applied in mechanical components surface to improve their wear and corrosion resistance. Metallic coat deposition processes have been showed efficient, in industrial application, to prevent damage on metallic component surfaces, exposed to aggressive environment. Protective coat application, using materials with superior quality relative to base component metal is a usual industrial practice, despite having coat quality control.

The technique of thermal spraying offers the possibility to coat construction materials mechanics such as common steel to carbon with other metals and leagues, objectifying to also protect them against the corrosion and to the wear.

Based on this context, the present work of this M.Sc. thesis has as objective to analyze and to compare the performance of the applied industrially metallic covering by thermal spraying processes. Its analyses coat based on the stainless steels AISI 316L, AISI 420 and mixture of these two steels, and evaluates the corrosion and wear resistance of applied coats. Corrosion resistance, from AISI 316L, and wear resistance, from AISI 420, is expected from the applied coat properties. Heat treatment was applied on the AISI 316L + AISI 420 coat, and evaluated its effect on coat properties.

The coats were applied by Thermal Spray Arc Process and it was analyzed the micro hardness of deposited materials and the corrosion and wear resistance of applied coats. With propose of wear resistance behavior, it was designing and manufactured a device based in pin on a disk test instrument, efficient on wear properties evaluation. Corrosion resistance test was made with electrochemical technique, in chlorine environment.

Mechanical, micro structural and chemical of applied coats were made with specific normalized tests for each desired properties evaluation. Optical and Electric Scanning Microscopy were used on the micro structure evaluation. X – Ray Diffractometry was used on coat phase components identification.

For all applied coat, the tests showed improvement on wear and corrosion resistance, improvement on surface micro hardness and cost porous in acceptable level close 6%. The thermal treatment applied improves all evaluated properties comparatively with no treated coat.

From obtained results, the arc thermal spray process showed to be a satisfactory performance on stainless steels AISI 316L, AISI 420 and mixture of these tow steels coat application on low carbon steel surface.

Keywords: Thermal spraying, corrosion, stainless steel.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.2.1 – Série eletroquímica, adaptado de [12].	18
Tabela 2.3.1 – Comparação entre processos de aspensão térmica, adaptado de [6,12,13].	38
Tabela 3.1 – Aplicação de Arames.	44
Tabela 3.2 – Composição Química dos Arames Utilizados (%).	44
Tabela 3.3 – Composição Química do Substrato (%).	45
Tabela 3.4 – Dimensões dos Corpos de Prova.	45
Tabela 3.5 – Parâmetros de Controle do Processo de Aspensão.	46
Tabela 3.6 – Parâmetros de Controle do Processo de Aspensão.	46
Tabela 3.7 - Condições de tratamento térmico do revestimento AISI 316L+420.	54
Tabela 4.1 – Porosidade do Metal Depositado (%).	61
Tabela 4.2 – Espessura do Metal Depositado.	61
Tabela 4.3 – Composição Química do Metal Depositado (%).	62
Tabela 4.4 – Rugosidade do Metal Depositado sem Tratamento Térmico.	65
Tabela 4.5 – Rugosidade do Revestimento AISI 316L+420 após realização de Tratamento Térmico.	65
Tabela 4.6 – Microdureza (HV) do Metal Depositado.	67
Tabela 4.7 – Perda de Massa (ld) em função da distância percorrida e do abrasivo utilizado (g/m).	68
Tabela 4.8 – Resultados da caracterização eletroquímica (ensaios de Ecorr, Icorr e curvas de Tafel).	71

## LISTA DE FIGURAS

• Figura 2.1.1 - Representação esquemática da superfície de um metal, adaptado de [12].	8
• Figura 2.1.2 - Objetivos práticos da tribologia, adaptado de [15].	9
• Figura 2.1.3 - Principais categorias de desgaste, adaptado de [12].	10
• Figura 2.1.4 - Processos utilizados na superfície de materiais para prevenção do desgaste.	11
• Figura 2.1.5 - Técnicas de aplicação de revestimentos, adaptado de [12].	13
• Figura 2.2.1 - Custos da corrosão, adaptado de [19].	16
• Figura 2.2.2 - Célula eletroquímica mostrando reações de corrosão e movimentos de íons e elétrons, adaptado de [24].	17
• Figura 2.2.3 - Diagrama de Pourbaix esquemático mostrando as regiões onde o ferro se apresenta nos estados estável, ativo e passivo, dependendo do potencial e do pH do meio, adaptado de [21].	19
• Figura 2.2.4 - Formas macroscópicas versus microscópicas de corrosão localizada, adaptado de [23].	20
• Figura 2.2.5 - Representação esquemática de uma curva de polarização com indicação de quatro técnicas de ensaio eletroquímicas de corrente contínua, adaptado de [2].	23
• Figura 2.2.6 - Ilustração esquemática das configurações adotadas para o ensaio de curvas de Tafel, adaptado de [2].	23
• Figura 2.2.7 - Curva de Tafel apresentando modo de determinação de $i_{corr}$ , $E_{corr}$ e das constantes de Tafel ( $\beta_a$ e $\beta_c$ ), adaptado de [27].	24
• Figura 2.2.8 - Curva de Tafel para taxas de corrosão controladas por ativação (a) e por difusão (b), adaptado de [2].	25
• Figura 2.2.9 - Características de corrosão de um metal ativo-passivo dependendo da energia de oxidação, adaptado de [22,35].	26
• Figura 2.3.1 - Processo de aspersão térmica aplicado para proteção contra corrosão.	29
• Figura 2.3.2 - Secção típica de um revestimento depositado por aspersão térmica, adaptado de [12].	30
• Figura 2.3.3 - Dr. Schoop in 1914 e seu primeiro dispositivo de aspersão térmica operada eletricamente, adaptado de [12].	31
• Figura 2.3.4 - Evolução das pistolas de aspersão térmica de 1940 a 1960, adaptado de [12].	32
• Figura 2.3.5 - Evolução dos processos de aspersão térmica, aplicações e materiais, adaptado de [6].	33
• Figura 2.3.6 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico, adaptado de [43].	34
• Figura 2.3.7 - Tocha de aspersão térmica a arco elétrico, de [38].	36

- Figura 2.4.1 - Fluxograma apresentando seqüência de análise estabelecendo a forma de proteção oferecida ao substrato em função das características do revestimento metálico, adaptado de [2]. 41
- Figura 3.1 - a) Equipamento de aspersão térmica; b) Pistola de aspersão. 46
- Figura 3.2 – Exemplos de possíveis configurações de grades que podem ser adotadas. 48
- Figura 3.3 - a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers. 50
- Figura 3.4 - Desenho esquemático de um corpo de prova para o ensaio de desgaste. 51
- Figura 3.5 - a) Equipamento abrasômetro; b) Detalhe do dispositivo de deslocamento do corpo de prova na execução do ensaio; c) Detalhe dos corpos de prova sob execução do ensaio. 51
- Figura 3.6 - Diagrama esquemático da célula eletroquímica desenvolvida para o ensaio de corrosão. 52
- Figura 3.7 - Célula eletroquímica para o ensaio de corrosão. 53
- Figura 3.8 - Potenciostato para realização de ensaio de corrosão. 53
- Figura 3.9 - Forno para tratamento térmico. 54
- Figura 4.1 - Micrografias óticas de seções transversais do revestimento Base Ni+4Al (aumento 200x). 56
- Figura 4.2 – Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L (aumento 200x). 56
- Figura 4.3 – Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 420 (aumento 200x). 57
- Figura 4.4 – Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L + 420 (aumento 200x). 57
- Figura 4.5 – Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L+420 após tratamento térmico (aumento 200x): a) T1; b)T2; c)T3; d)T4. 58
- Figura 4.6 – Microscopia eletrônica de varredura (aumento 500x): a) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L; b) Micrografia da amostra com revestimento AISI 420. 59
- Figura 4.7 – Microscopia eletrônica de varredura: a) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L+420 (aumento 200x); b) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L+420 (aumento 500x). 59
- Figura 4.8 – Microscopia eletrônica de varredura - Micrografia da amostra com revestimento AISI 420 (aumento 2000x). 60
- Figura 4.9 – Difractograma de raios-X da amostra com revestimento Base Ni+4Al. 63
- Figura 4.10 – Difractograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 316L. 63

- Figura 4.11 – Difractograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 420. 64
- Figura 4.12 – Difractograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 316L+420. 64
- Figura 4.13 – Rugosidade dos revestimentos depositados. 65
- Figura 4.14 – Influência do tratamento térmico na rugosidade para o revestimento AISI 316L+420. 66
- Figura 4.15 – Microdureza Vickers dos revestimentos depositados. 67
- Figura 4.16 – Microdureza Vickers do revestimento AISI 316L+420 após tratamento térmico. 68
- Figura 4.17 – Relacionamento entre desgaste, carga aplicada e granulometria do abrasivo utilizado. 69
- Figura 4.18 - Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do substrato (aumento 500x); b) Amostra da superfície do substrato (aumento 2000x). 70
- Figura 4.19 - Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L (aumento 500x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L (aumento 2000x). 70
- Figura 4.20 - Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 420 (aumento 200x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 420 (aumento 500x). 70
- Figura 4.21 - Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L+420 (aumento 200x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L+420 (aumento 500x). 71
- Figura 4.22 - Curva de Polarização Potenciodinâmica Anódica – Revestimentos depositados. 72
- Figura 4.23 - Curva de Polarização Potenciodinâmica Anódica – Aço inoxidável AISI 316L (maciço). 73
- Figura 4.24 – Curvas de Tafel – Revestimentos utilizados e substrato. 74
- Figura 4.25 – Curvas de Tafel – Comparação entre revestimentos utilizados, substrato e aço AISI 316L maciço. 74
- Figura 4.26 – Curvas de Tafel – Revestimento AISI 316L+420 com e sem tratamento térmico e substrato. 75
- Figura 4.27 – Corpo de prova após ensaios de corrosão. 76

**LISTA DE SIGLAS**

<b>ABNT</b>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas.
<b>ASM</b>	- American Society of Metals
<b>ASTM</b>	- American Society for Testing Materials
<b>ISO</b>	- International Standardization Organization
<b>NBR</b>	- Norma Brasileira.
<b>SAE</b>	- Society of Automotive Engineers
<b>µm</b>	- Micrometro.
<b>mm</b>	- Milímetro.
<b>Å</b>	- Angstrom
<b>Ø</b>	- Diâmetro
<b>λ</b>	- Comprimento de onda
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	- Metros cúbicos por hora
<b>m/s</b>	- Metros por segundo
<b>°C</b>	- Grau Celsius
<b>%</b>	- Percentual
<b>Kg/h</b>	- Quilograma por hora
<b>kW</b>	- Quilowatt

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1 Apresentação do Problema e Motivação	2
1.2 Objetivos	
1.3 Apresentação	
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 Engenharia de Superfície, Desgaste e Tecnologia de Revestimentos	6
2.2 Corrosão Metálica	14
2.3 Aspersão Térmica	28
2.4 Proteção Contra a Corrosão através de Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica	39
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>43</b>
3.1 Materiais de Revestimento	44
3.2 Produção dos Corpos de Prova e Preparação Metalográfica	45
3.3 Aspersão Térmica – Equipamento e Parâmetros de Processo	45
3.4 Ensaios de Caracterização dos Revestimentos	47
3.5 Tratamento Térmico	54
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>55</b>
4.1 Introdução	56
4.2 Caracterização Macro e Microestrutural	56
4.3 Medição da Rugosidade Superficial do Revestimento	64
4.4 Caracterização das Propriedades Mecânicas	66
4.5 Caracterização Eletroquímica	71
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>77</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>79</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>
<b>8. APÊNDICE</b>	<b>86</b>

## **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

## **1.1 Apresentação do Problema e Motivação**

Componentes metálicos, cujas superfícies estejam expostas a ambientes agressivos e sujeitos a degradação por ação química ou eletroquímica (corrosão), por ação mecânica (desgaste), ou à ação combinada desses dois fenômenos podem ser protegidos pela aplicação de revestimentos [1,2]. Estes revestimentos podem ser aplicados por diversas técnicas e processos como: eletrodeposição, pintura, soldagem e aspersão térmica.

Uma previsão realística da perda econômica, devido ao desgaste de materiais por corrosão, nos países industrializados, é de cerca de 3 a 4% do produto interno bruto ao ano [3], estimando-se ainda que 40% deste total poderiam ser evitados, aplicando-se técnicas de proteção [1].

Como o desgaste é um fenômeno tipicamente superficial, há a necessidade de processos que sejam utilizados com sucesso na prevenção e minimização do desgaste e corrosão de componentes mecânicos, na manutenção de peças desgastadas e na diminuição do custo de fabricação de novas peças.

Dentre os vários processos, a aspersão térmica se apresenta com potencial para ser usada na aplicação de revestimentos em equipamentos ou componentes estruturais para satisfazer várias necessidades de proteção, de manutenção e de recuperação. Tais ações vão desde a reparação de superfícies de peças desgastadas ou danificadas em serviço, passando por processos de restauração dimensional, chegando a um aumento na vida útil do componente otimizando as propriedades físicas da superfície.

A aspersão térmica consiste de um grupo de processos nos quais partículas finamente divididas de materiais de revestimento, metálicos ou não-metálicos, são depositadas sobre um substrato devidamente preparado, na condição fundida ou semi-fundida, para formar uma camada superficial.

Através da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico a partir de uma tocha de aspersão, é gerado o calor necessário para a execução da operação de revestimento [4]. As partículas aquecidas são aceleradas por um gás comprimido, confinadas num feixe, e dirigidas ao substrato. Ao se chocarem com a superfície da peça, as partículas solidificam e aderem pela interação mecânica e metalúrgica. As camadas são interligadas química e mecanicamente, cada uma se sobrepondo à camada precedente. O processo continua até que seja obtida a espessura desejada do revestimento.

As vantagens preliminares da aspersão térmica incluem a escala dos materiais quimicamente diferentes que podem ser aspergidos, a taxa de revestimento elevada de deposição permitindo que revestimentos mais espessos sejam aplicados e também a portabilidade do equipamento para aspersão [5].

A escolha da técnica de aspersão mais adequada, a ser utilizada, envolve dentre outros aspectos, o estudo do tipo de desgaste, a escolha do metal de adição e o procedimento de operação mais adequado, além do estudo do custo envolvido no reparo/deposição.

Os processos de aspersão térmica são agrupados em três categorias principais: processos a combustão (Flame Spray Processes), processos a arco elétrico (Electric Arc Spray Processes), e processos de aspersão térmica por plasma (Plasma Arc Processes) [6].

O material de revestimento, que pode ser na forma de pó, vareta, cordão ou arame, proporciona diferenças na estrutura e composição química devido à sua natureza, à reação do revestimento com gases do processo e à atmosfera em torno do material de revestimento [7].

Uma combinação de propriedades incluindo resistência à corrosão, dureza, resistência à abrasão, resistência ao impacto e ao calor, devem ser consideradas quando se relacionam materiais de adição para revestimento.

O requerimento de dureza pode ser a alta temperatura e/ou a temperatura ambiente. A resistência à abrasão está, às vezes, relacionada com a dureza e depende do tipo de desgaste e dos constituintes individuais do revestimento, como os carbonetos presentes no metal de adição.

No aspecto relativo à corrosão, o mecanismo de proteção está relacionado ao efeito de proteção por ânodo de sacrifício e por barreira (proteção catódica – revestimentos anódicos), por proteção por passivação (revestimento catódicos) e proteção por revestimentos neutros (cerâmicos) [1,8].

Revestimentos como alumínio e suas ligas, Al-25% SiC, titânio e suas ligas, WC-17% Co, aço inoxidável, níquel, cromo, magnésio e suas ligas, cobre e suas ligas, alumina e óxidos de cromo, e materiais compósitos poliméricos são utilizados com sucesso no processo de aspersão térmica.

Em geral, através desses processos e com os revestimentos depositados, podem-se obter diversas composições químicas e valores de dureza. Entretanto, é geralmente vantajoso obter-se uma superfície metálica com algum grau de ductilidade, pois dessa forma a ligação entre as partículas e os substratos é favorecida com consequência direta no decréscimo de propensão a trincas [9,10].

Revestimentos com aços inoxidáveis, aplicados através de processos de deposição por aspersão térmica, constituem-se em uma alternativa bastante eficiente para proteger os componentes de aço em ambientes corrosivos aliada a uma boa resistência mecânica do revestimento [11].

Neste trabalho são estudados os revestimentos à base de aço inoxidável austenítico AISI 316L e do martensítico AISI 420 que foram aplicados através do processo de aspersão a Arco Elétrico (AS, Arc Spraying).

A eficiência dos revestimentos foi verificada pela avaliação da influência dos materiais de revestimento e dos parâmetros de processo adotados, pela caracterização macro e microestrutural (difração de raios-X, composição química, rugosidade, porosidade, microscopia ótica e de varredura), através das propriedades mecânicas de microdureza, propriedades de resistência ao desgaste e do comportamento do revestimento quanto à corrosão através de medidas eletroquímicas de polarização.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento de resistência ao desgaste e à corrosão dos revestimentos de aço inoxidável AISI 316L e AISI 420 e a mistura destes, analisando criticamente suas aplicabilidade e reprodutibilidade.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Avaliar o comportamento dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420, aplicados como revestimentos em superfícies de aço carbono SAE/ABNT 1010, através do processo de aspersão térmica a arco elétrico;

Validar os parâmetros do processo de aspersão aplicado industrialmente, com verificação do nível de porosidade, da resistência ao desgaste e a corrosão dos revestimentos;

Construir um equipamento para ensaios de verificação da resistência ao desgaste;

## **1.3 Apresentação**

Para atender aos objetivos propostos, esta dissertação foi estruturada por capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução ao trabalho, com a motivação para sua realização. O capítulo 2 refere-se aos objetivos gerais e específicos a que se destina esse projeto. A revisão bibliográfica com a fundamentação teórica necessária para suporte à pesquisa realizada, foi descrita no capítulo 3, sendo abordados temas relativos à técnica de deposição de revestimentos metálicos por aspersão térmica para proteção contra corrosão e desgaste. Já o capítulo 4 aborda as técnicas de experimentação adotadas no desenvolvimento da pesquisa, relatando os materiais, ensaios e métodos empregados, além de equipamentos desenvolvidos. O capítulo 5 apresenta o resultado do desempenho dos revestimentos estudados juntamente com a sua análise. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e no capítulo 7 as sugestões para futuros trabalhos. Ao final da dissertação, no capítulo 8, são relacionadas as referências bibliográficas consultadas e um apêndice apresentando publicações resultantes da pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIE, DESGASTE E  
TECNOLOGIA DE REVESTIMENTOS**

### **2.1.1 Introdução**

O comportamento de um componente de Engenharia é uma consequência extremamente dependente da superfície do material, da área de contato nesta superfície e do ambiente sob o qual o material é solicitado, já que este trabalha em ambientes complexos que apresentam cargas elevadas, velocidades elevadas, atrito elevado, elevadas temperaturas e atmosferas agressivas.

Esta superfície pode requerer algum tratamento para melhoria de características superficiais. Alguns tratamentos de superfície promovem alterações na microestrutura do material como a têmpera. Outros tratamentos alteram as características químicas da superfície como a aluminização ou cromagem.

Os revestimentos duros correspondem à outra forma de tratamento da superfície, onde na grande maioria das situações, é aplicada uma camada protetora de um outro material que apresenta propriedades superiores à superfície de base [12].

As seguintes seções descreverão conceitos de Engenharia de Superfície, Desgaste e Tecnologia de Revestimentos. A técnica de revestimento duro, com ênfase particular no processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico (AS, Arc Spray) será descrita na seção 2.3.

### **2.1.2 Engenharia de Superfície**

A Engenharia de Superfície é uma atividade que busca um aumento na eficiência das propriedades das superfícies de componentes de Engenharia e pode ser definida como o “Tratamento das regiões da superfície e próximas à superfície de um material para permitir que a mesma execute as funções que são inerentes àquelas exigidas para o material” [13].

As propriedades ou características desejadas para os materiais tratados superficialmente incluem melhorias quanto à resistência à corrosão, resistência ao desgaste, à fadiga, ao isolamento térmico e elétrico e ao aspecto visual [14].

As características superficiais dos materiais de engenharia têm um efeito significativo na aplicabilidade e na vida útil de um componente. Por sua vez, os componentes devem executar suas funções completamente e eficazmente, sob várias circunstâncias em ambientes agressivos, os quais são normalmente complexos, combinando esforços de carregamentos com degradação química e física à superfície do componente.

### **2.1.3 Superfícies dos Sólidos**

A superfície de um componente metálico pode apresentar-se visualmente limpa, porém uma melhor observação desta superfície pode revelar a presença de micro-camadas de outros materiais depositados nesta superfície, resultantes do processo de fabricação do componente, ou simplesmente pela ação do meio ambiente, como temperatura e umidade que levam à formação de óxidos na superfície deste componente. A figura 2.1.1 esquematiza tais efeitos sobre a superfície de um substrato.

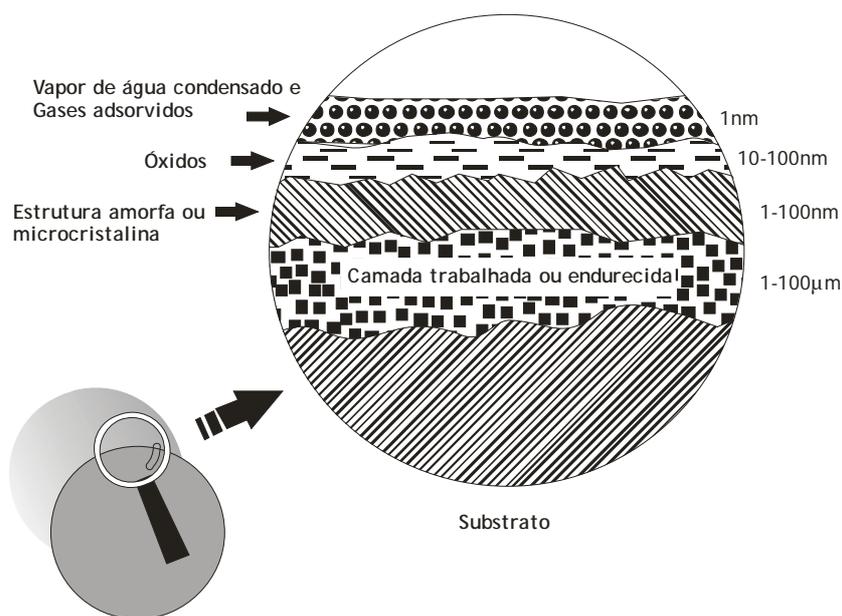


Figura 2.1.1 – Representação esquemática da superfície de um metal, adaptado de [12].

Dependendo do processo de manufatura adotado, será formada uma camada trabalhada e endurecida que se constituirá na base para deposição de camadas adicionais. Acima desta camada concentra-se uma estrutura molecular amorfa ou micro-cristalina que é o resultado da fusão da superfície durante o processo de produção.

A região seguinte consiste em uma camada de óxido formada devido ao oxigênio disponível no ambiente externo e aos mecanismos de oxidação da superfície. A camada exterior é composta de vapor de água ou hidrocarbonetos do ambiente que podem ter sido condensados ou adsorvidos física ou quimicamente na superfície do material [12].

## **2.1.4 Propriedades Tribológicas dos Revestimentos Metálicos**

### **2.1.4.1 Introdução**

Os fenômenos físicos e químicos que governam o atrito e o desgaste ocorrem nas superfícies dos sólidos em contato com movimento relativo. Geralmente, os mecanismos da interação nas superfícies são os mais críticos para o desempenho tribológico.

A introdução de um líquido entre as superfícies tem sido por muito tempo a maneira mais comum de se alterar o comportamento tribológico no contato de duas superfícies em movimento relativo.

Uma outra possibilidade cada vez mais crescente tem sido a aplicação de uma fina camada na superfície ou a aplicação de revestimentos em uma ou ambas superfícies em movimento relativo. Esta melhoria é promovida pelas novas técnicas de revestimento que foram desenvolvidas nas últimas décadas [16].

### 2.1.4.2 Tribologia

A Tribologia focaliza o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação e pode ser definida como “A Ciência e a Tecnologia que estuda a interação e seus efeitos, entre duas superfícies em contato, com movimento relativo”; assuntos e práticas relacionadas ao atrito são também estudados na tribologia [15,17].

### 2.1.4.3 Variáveis Tribológicas

As variáveis tribológicas são o atrito e o desgaste, sendo o desgaste a principal causa da perda de material e do desempenho mecânico do componente.

O atrito é a principal causa da dissipação de energia e, por conseguinte, do desgaste. É possível obter economia através de controle do atrito, melhorado as condições de contato entre superfícies móveis. Estima-se que um terço dos recursos de energia em uso no mundo atual é utilizado para superar o atrito. A lubrificação se torna um meio eficaz de reduzir o atrito e de controlar o desgaste.

Em termos simples, o objetivo prático da tribologia é minimizar duas desvantagens principais do contato entre sólidos: o atrito e o desgaste, mas não necessariamente estes são sempre os casos. Em algumas situações, conforme ilustrado na figura 2.1.2, a minimização do atrito e maximização do desgaste ou a minimização do desgaste e maximização do atrito ou a maximização do atrito e do desgaste são desejáveis. A redução do desgaste, mas não do atrito é desejável em freios e embreagens e o aumento do atrito e desgaste é desejável no uso borrachas escolares, por exemplo [15].

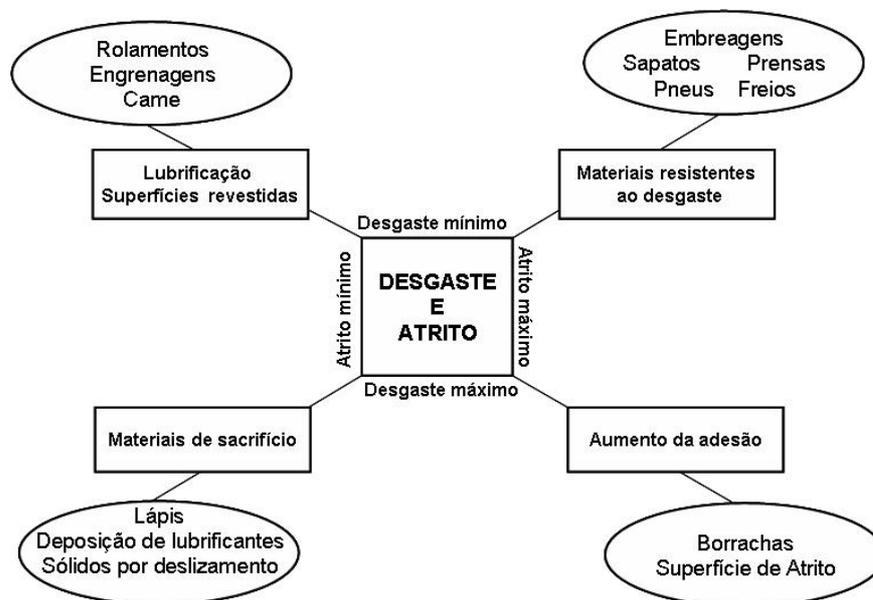


Figura 2.1.2 – Objetivos práticos da tribologia, adaptado de [15].

### 2.1.4.5 Efeitos na Superfície Provocados pelo Desgaste

O desgaste, por se tratar de um processo de remoção de material de uma ou ambas as superfícies em contato contínuo sob movimento de deslizamento ou rolamento, apresenta uma taxa de remoção de material geralmente lenta, mas constante e contínua. A figura 2.1.3 mostra as cinco categorias principais de desgaste e os mecanismos específicos que ocorrem em cada uma [12,17].

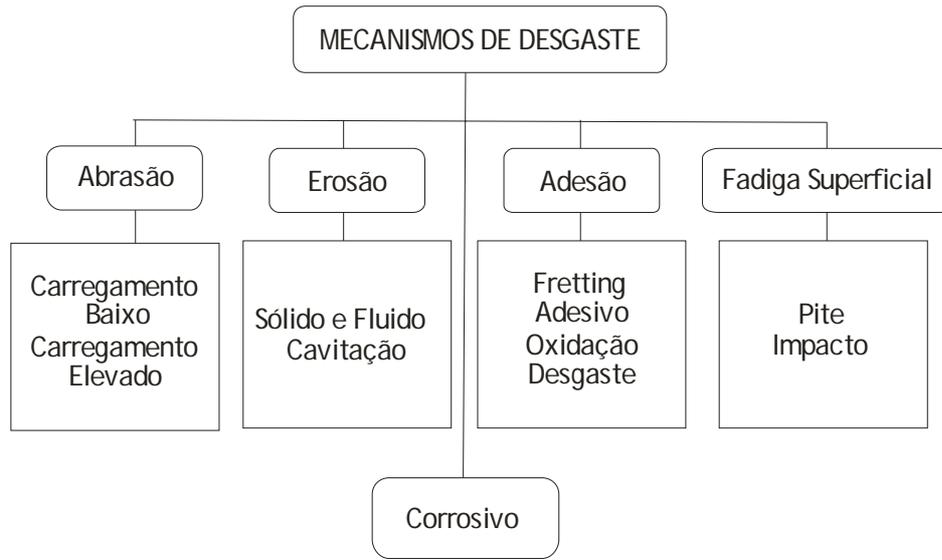


Figura 2.1.3 – Principais categorias de desgaste, adaptado de [12].

### 2.1.5 Desgaste

Podemos definir o desgaste como sendo a perda de material provocado pelo deslizamento ou rolamento de superfícies em contato. Assim como o atrito, o desgaste compartilha de uma característica comum, ou seja, a complexidade dos mecanismos atuantes. Estes mecanismos podem ser divididos em [15,18]:

- Desgaste por Adesão;
- Desgaste por Abrasão;
- Desgaste por Erosão;
- Desgaste por Cavitação;
- Desgaste por Fadiga;
- Desgaste por Impacto;
- Desgaste por Fusão;
- Desgaste por Corrosão.

Como um fator adicional que influencia o desgaste de alguns materiais, a cinemática do movimento relativo dentro da zona do contato também deve ser mencionada. Dois grupos de mecanismo de desgaste podem ser identificados: o

primeiro compreendendo aqueles dominados pelo comportamento mecânico dos materiais, e o segundo que compreende aqueles definidos pela natureza química dos materiais. Em quase cada situação é possível identificar o mecanismo principal do desgaste, que é determinado geralmente pelas propriedades mecânicas e pela estabilidade química do material, pela temperatura dentro da zona do contato, e pelas circunstâncias de operação [18].

O desgaste é uma conseqüência inevitável do contato de superfícies em movimento, podendo ser controlado ou minimizado, mas não eliminado. Em Engenharia utilizam-se vários processos para controlar ou evitar o desgaste de superfícies em contato, entre eles:

- Controle das propriedades do material;
- Utilização de materiais de maior dureza;
- Otimização da geometria das peças em contato;
- Controle das condições ambientais;
- Melhoramento do acabamento superficial dos materiais em contato;
- Eliminação de partículas em suspensão no fluido lubrificante;
- Aplicação de materiais diferentes nas superfícies em contato (revestimentos), onde se situa nosso objeto de estudo.

### 2.1.6 Métodos para Controle do Desgaste

O desgaste que ocorre em um tribosistema (sistema de desgaste) pode ser prevenido através da aplicação de revestimentos ou através de modificações metalúrgicas ou químicas do substrato, conforme mostrado na figura 2.1.4 [14]:

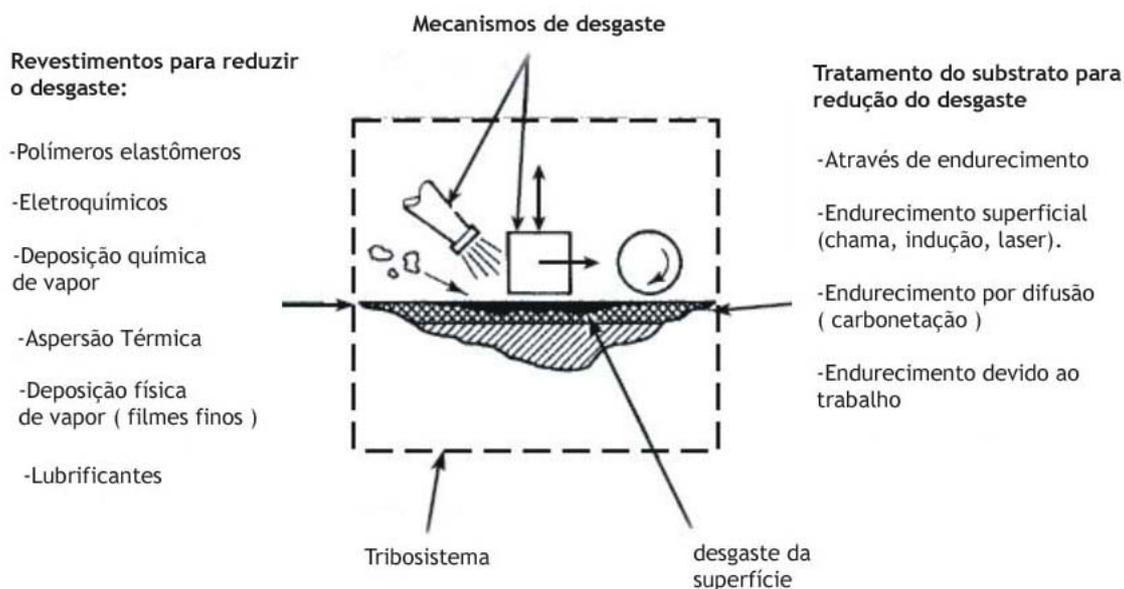


Figura 2.1.4 – Processos utilizados na superfície de materiais para prevenção do desgaste.

As técnicas mais tradicionais aplicadas para controle do desgaste são:

- Separação das superfícies através da aplicação de um filme lubrificante;
- Escolha de materiais com resistência à fadiga;
- Melhoramento da superfície deixando-a resistente ao desgaste por fratura;
- Melhoramento da superfície deixando-a resistente ao desgaste por corrosão;
- Escolha de materiais que são resistentes à interação metal-metal durante o movimento relativo entre superfícies;
- Otimizar a superfície do material deixando-a resistente ao desgaste com a aplicação de técnicas de revestimento ou outros tratamentos.

### **2.1.7 Tecnologia de Revestimentos**

Revestimentos consistem na deposição de um material específico na superfície de um outro material ou do mesmo material e pode ser considerado como um dos produtos mais extensamente utilizados para o controle e proteção de superfícies em longo prazo de desgaste por circunstâncias corrosivas ou não, que vão desde a exposição atmosférica até as condições de processo quando expostas a produtos químicos ou solicitações, além de também melhorar a aparência da superfície.

A função principal do revestimento protetor é de isolar elementos estruturais reativos ou não de ambientes que possam degradar sua superfície. Um revestimento deve fornecer uma barreira contínua a um substrato, pois qualquer imperfeição poderá transformar-se em um ponto localizado para degradação do substrato.

Os revestimentos de superfícies metálicas compreendem uma larga escala de processos que são utilizados pela grande maioria das indústrias em operações de manufatura de peças metálicas e são tipicamente executados em peças após serem produzidas e dada a sua forma final.

A qualidade de um revestimento depende de muitos fatores além de proporcionar resistência à corrosão, resistência à abrasão e melhorar a aparência superficial. São utilizados também como base para a adesão de outros materiais, melhoram as características de atrito, aumentam a dureza, proporcionam uma melhor soldabilidade e adicionam propriedades elétricas de uma forma geral.

A melhor técnica de aplicação de revestimentos disponível para qualquer sistema depende de exigências funcionais (dimensão, forma e metalurgia do substrato), da adaptabilidade do material à técnica pretendida em nível de adesão requerida e da disponibilidade e custo do equipamento.

A figura 2.1.5 mostra as técnicas geralmente utilizadas na aplicação de revestimentos, sendo divididas em revestimentos metálicos e revestimentos não-metálicos (orgânicos e inorgânicos) [3, 12].

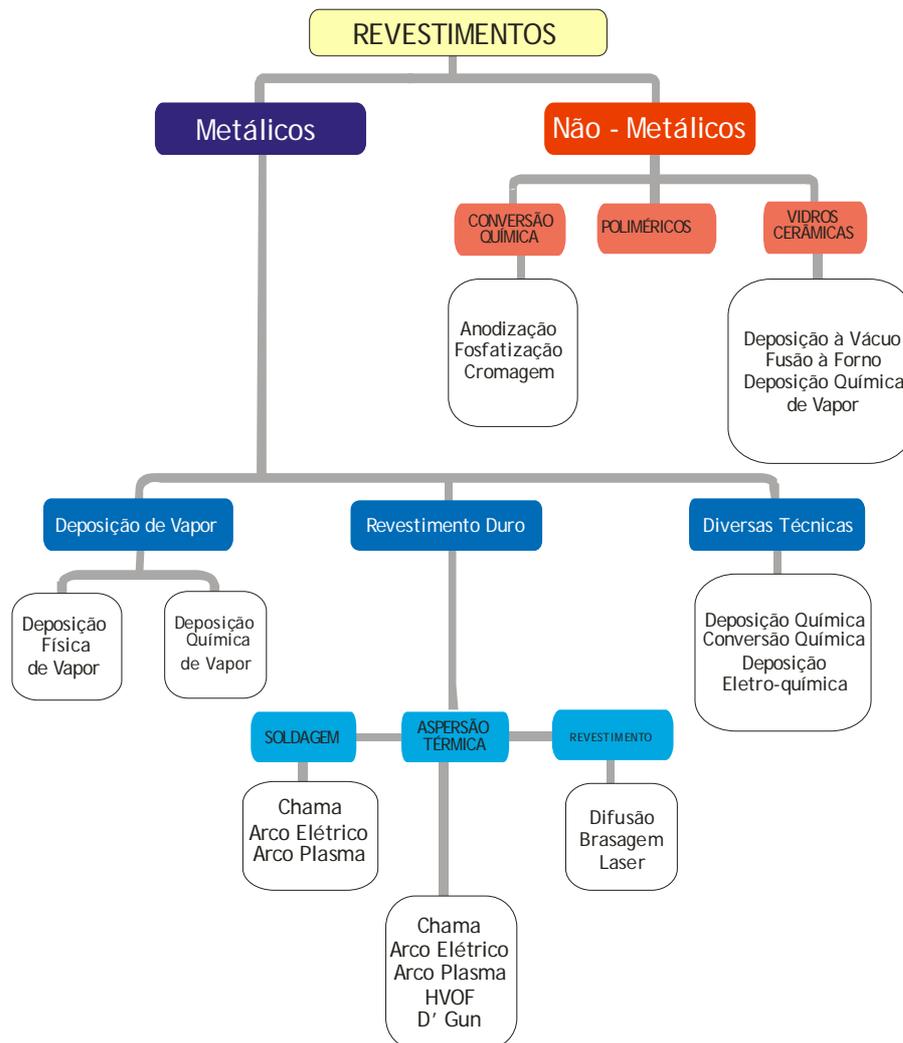


Figura 2.1.5 – Técnicas de aplicação de revestimentos, adaptado de [12].

A aplicação de revestimentos duros é utilizada para a deposição de um material resistente ao desgaste em um componente de Engenharia (substrato). Dentre os revestimentos duros, a técnica de *Aspersão Térmica* será apresentada mais detalhadamente na seção 2.3.

## **2.2 CORROSÃO METÁLICA**

### **2.2.1 Introdução**

A corrosão é o ataque destrutivo de um material pela reação com seu ambiente sendo que as conseqüências do processo corrosivo transformaram-se em um problema de significância mundial. Seu estudo e da proteção dos materiais que estão sujeitos a este fenômeno é relativamente recente. Em 1944, foi fundada nos Estados Unidos a National Association of Corrosion Engineers – NACE, tornando-se a associação mais importante para os assuntos relacionados à corrosão. Uma previsão considerada realística da perda econômica devido à corrosão em países industrializados é de cerca de 3 a 4% do produto interno bruto, e em especial nos Estados Unidos, é de 30 bilhões de dólares por ano.

O controle ou minimização da corrosão pode ser conseguido compreendendo-se seus mecanismos, utilizando-se materiais e projetos resistentes à corrosão e também através da aplicação de sistemas, dispositivos e tratamentos protetores. Isso tudo demonstra como é fundamental uma análise dos fenômenos que provocam a corrosão, assim como um aprofundamento de técnicas e aplicações para reduzir a corrosão dos materiais. Contudo, a enorme variedade de materiais que sofrem corrosão, associada aos demais ambientes corrosivos, torna extremamente complexo o estudo desse processo.

### **2.2.2 Definição de Corrosão**

Podemos definir a corrosão como sendo um fenômeno superficial que envolve a reação entre o material e o meio (por ação química ou eletroquímica), durante um tempo suficiente para que ocorra a deterioração do material e de suas propriedades, aliada ou não a esforços mecânicos.

Este processo se dá porque grande parte dos materiais metálicos está sujeita à deterioração devido a fatores físico-químicos que determinam que sistemas pouco estáveis energeticamente tendam a sofrer transformações que os levam a patamares de maior estabilidade, obedecendo as leis cinéticas e termodinâmicas regentes de tais processos químicos [20,21,23,24].

### **2.2.3 Efeitos Econômicos**

A deterioração progressiva devido à corrosão de superfícies metálicas em uso em plantas industriais conduz a paradas não programadas, desperdício de recursos valiosos, perda ou contaminação do produto, redução na eficiência, custos elevados de manutenção e inibe o progresso tecnológico.

Os custos da corrosão referentes a cinco setores principais da economia americana podem ser observados na figura 2.2.1 [3,14,19]:

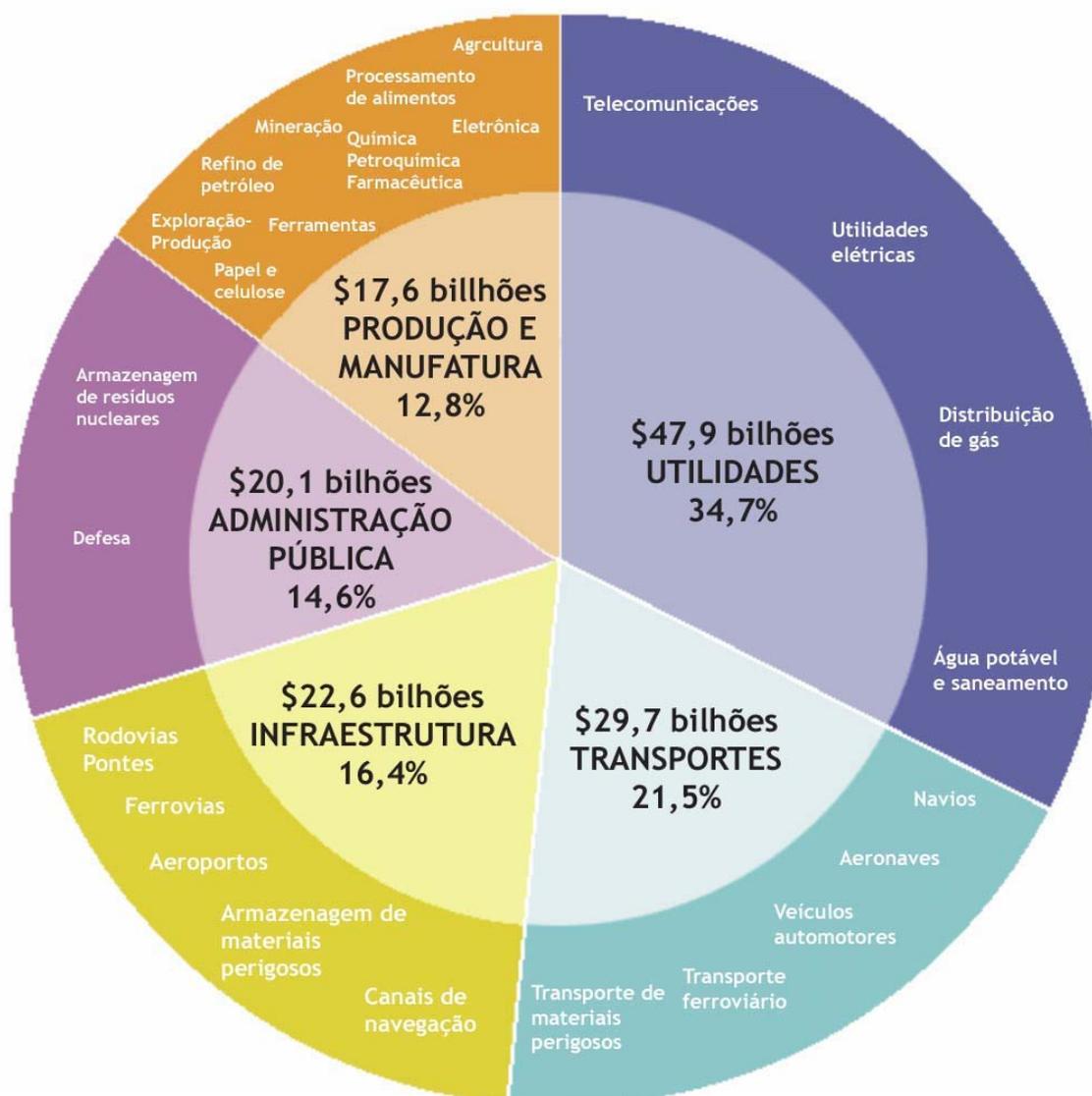


Figura 2.2.1 – Custos da corrosão, adaptado de [19].

#### 2.2.4 O Processo Corrosivo

A corrosão é um processo eletroquímico em que um metal reage com seu ambiente formando um óxido ou outro composto. A célula que provoca este processo de corrosão apresenta quatro constituintes essenciais:

- Ânodo: é o eletrodo onde ocorre a oxidação (corrosão) e de onde a corrente, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Eletrólito: é o meio condutor (geralmente um meio líquido) que contém os íons que transportam a corrente até o cátodo;
- Cátodo: é o eletrodo onde ocorre a redução e o local onde a corrente sai do eletrólito;

d) Circuito Metálico: é a ligação entre o ânodo e o cátodo, por onde fluem os elétrons, no sentido ânodo-cátodo.

No ânodo, íons positivamente carregados passam pelo eletrólito corroendo o metal e liberando os elétrons que participam da reação catódica. A partir deste ponto, a corrente de corrosão entre o ânodo e cátodo consiste no fluxo de elétrons dentro do metal e do fluxo de íons no eletrólito [8,25,26].

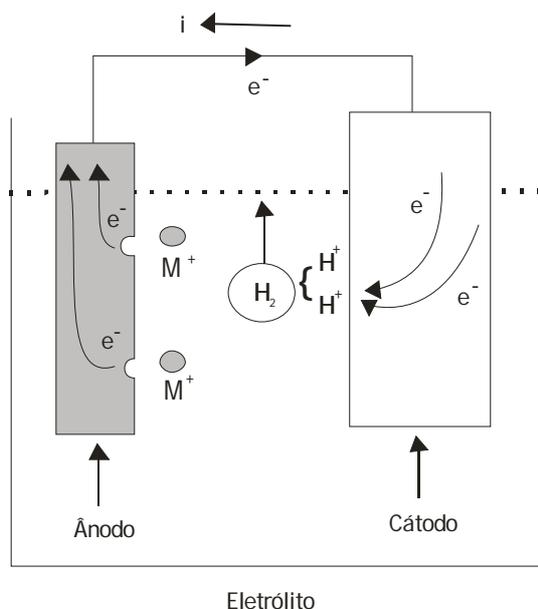


Figura 2.2.2 – Célula eletroquímica mostrando reações de corrosão e movimentos de íons e elétrons, adaptado de [24].

A figura 2.2.2 mostra esquematicamente uma das mais simples reações de corrosão presentes em meios isentos de oxigênio. Podemos notar que há a formação de uma célula eletroquímica com a presença das semi-reações anódicas e catódicas seguintes:



Através da figura percebe-se que as reações eletroquímicas que ocorrem na célula de corrosão produzem tanto um fluxo de elétrons quanto a migração de espécies químicas através do eletrólito, ocorrendo simultaneamente os processos de oxidação na superfície do ânodo, redução na superfície do cátodo, fluxo de elétrons entre eles através de uma conexão metálica e fluxo de íons através de um eletrólito.

A capacidade dos metais de resistir à corrosão é um fator dependente de sua posição na série eletroquímica conforme (tabela 2.2.1), observa-se que quanto mais negativo o potencial, mais facilmente ocorrerá a oxidação do elemento [8,22,25].

Elemento	Íon	Potencial do eletrodo (V)	Potencial padrão do Hidrogênio (V <sub>0</sub> )
Magnésio	Mg <sup>2+</sup>	-1,87 ( Ativo )	0.7
Alumínio	Al <sup>3+</sup>	-1,35	0.5
Zinco	Zn <sup>2+</sup>	-0,76	0,7
Cromo	Cr <sup>2+</sup>	-0.6	0.32
Ferro	Fe <sup>2+</sup>	-0.44	0.18
Cádmio	Cd <sup>2+</sup>	-0.4	0.5
Cobalto	Co <sup>2+</sup>	-0.29	
Níquel	Ni <sup>2+</sup>	-0.22	0.15
Estanho	Sn <sup>2+</sup>	-0.14	0.45
Chumbo	Pb	-0.13	0.45
Hidrogênio	H <sup>+</sup>	0.00	-
Antimônio	Sb <sup>3+</sup>	+0.11	0.42
Cobre	Cu <sup>2+</sup>	+0.34	0.25
Prata	Ag <sup>+</sup>	+0.8	0.1
Ouro	Au <sup>3+</sup>	+1.3 ( Nobre )	0.35
Oxigênio	OH <sup>-</sup>	+0.4	
Cloro	Cl <sup>-</sup>	+1.36	

Tabela 2.2.1 – Série eletroquímica, adaptado de [8].

Os dois metais mais distanciados um do outro na série eletroquímica apresentam o maior diferencial de potencial em contato na presença de um eletrólito. O metal mais acima da tabela é atacado mais rapidamente, enquanto o metal mais abaixo da tabela (de maior potencial) está mais protegido.

### 2.2.5 Tendências Termodinâmicas

Para os elétrons fluírem entre o ânodo e cátodo há uma força direcional conhecida como a diferença de potencial entre os pontos anódicos e catódicos. Esta diferença de potencial é originada devido a cada reação de oxidação ou redução associada a um potencial determinado pela tendência de reação que ocorre espontaneamente, tornando-se o potencial uma medida desta tendência.

Um meio extremamente usado para estudar a relação de potencial para corrosão é através de um diagrama de equilíbrio desenvolvido por Pourbaix, que colocou em um gráfico potencial *versus* pH, um parâmetro igualmente de grande importância para processos de corrosão.

Dependendo de diversas condições, entre elas o pH do meio e o potencial do sistema, um material metálico pode assumir em meio aquoso os estados de equilíbrio ativo, passivo e estável (previstos termodinamicamente pelos diagramas de Pourbaix).

A figura 2.2.3 apresenta um diagrama de Pourbaix esquemático (simplificado) para um dado material ferroso em meio aquoso [21,25,26]:

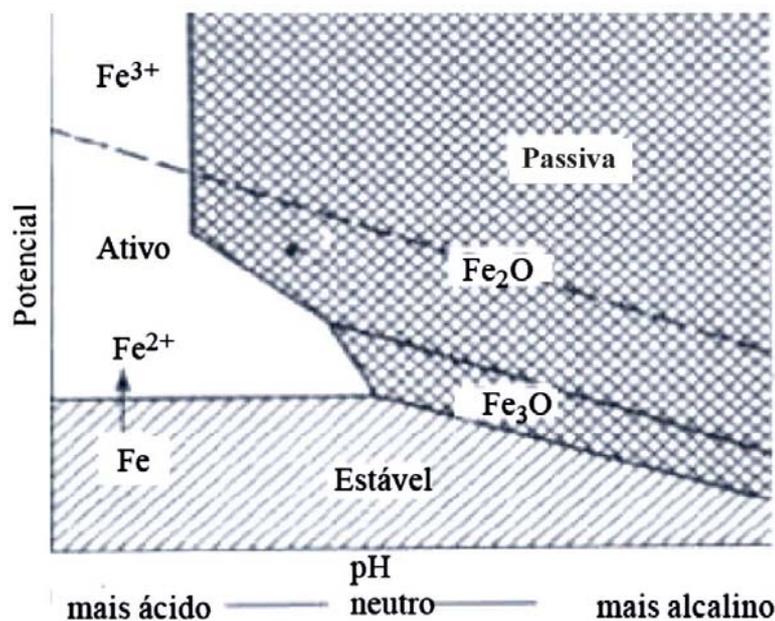


Figura 2.2.3 – Diagrama de Pourbaix esquemático mostrando as regiões onde o ferro se apresenta nos estados estável, ativo e passivo, dependendo do potencial e do pH do meio, adaptado de [21].

Conforme visualizado no diagrama, para potenciais muito baixos o material se apresenta estável e não reage com o meio (muito embora possam estar ocorrendo diversas reações em sua superfície), o que significa que não existe a possibilidade de ocorrer a degradação do material. Este estado estável pode existir em um aço ao carbono quando se aplica proteção catódica, por exemplo, com ânodos de sacrifício ou corrente impressa, pois se leva o material a um potencial mais negativo, o que significa que existem elétrons de sobra para suprir as reações em sua superfície sem que haja uma perda de seus próprios elétrons.

Para potenciais mais altos, em pH ácido, o material se apresenta ativo e com dissolução constante, o que significa que pode estar ocorrendo corrosão generalizada com perda de massa e afinamento da seção, geralmente com a perda de desempenho quando a espessura já não pode suportar o carregamento imposto. É comum verificar perdas de espessura durante processos de limpeza química, por exemplo, onde os produtos são muito ácidos e ativam o metal, dissolvendo-o.

Para potenciais mais altos, em pH alcalino, o material forma uma película de óxido que pode protegê-lo do meio (tornando-o passivo). Este estado passivo pode ser verificado em aços ao carbono em quase todas as condições industriais onde se utiliza água tratada em sistemas fechados. Usualmente os tratamentos de água são realizados com produtos que formam uma película protetora na superfície de tubos ou equipamentos, com vistas a passivar os materiais, mas sempre com o cuidado de não alcalinizar demais a água para não favorecer incrustações. A corrosão em materiais que passivam é pontual e a mais crítica pois a falha pode ocorrer antes de que se possa detectar o processo corrosivo.

Os diagramas de Pourbaix são termodinâmicos (diagramas de equilíbrio), e não apresentam indicativos da velocidade (cinética) das reações e nem das taxas de corrosão, que podem ser avaliadas através das leis da cinética e levantamento das curvas de polarização.

### 2.2.6 Formas de Corrosão

As formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos, podendo ser classificada então conforme [20]:

- A morfologia – uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- As causas ou mecanismos – por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- Os fatores mecânicos – sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- O meio corrosivo – atmosférica, pelo solo, induzida por microorganismos, pela água do mar, por sais fundidos, etc.;
- A localização do ataque – por pite, uniforme, intergranular, transgranular, etc.

A figura 2.2.4 classifica alguns mecanismos macroscópicos e microscópicos de corrosão [23]:

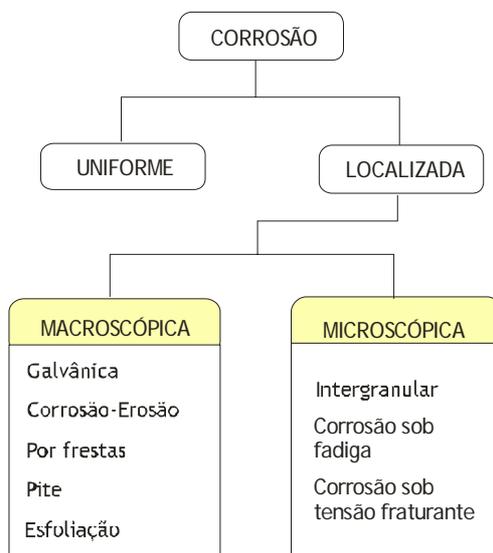


Figura 2.2.4 – Formas macroscópicas versus microscópicas de corrosão localizada, adaptado de [23].

## **2.2.7 Mecanismos de Controle da Corrosão**

Os vários métodos que podem ser usados proteger um sistema metálico de encontro à corrosão podem ser divididos em proteção por barreira, projeto estrutural, controle ambiental, projeto metalúrgico (seleção do material), proteção termodinâmica e proteção cinética. Uma reação eletroquímica pode ser limitada também através do controle da polarização, limitando a redução catódica por meio de vários processos físicos e químicos, na interface entre o metal e o eletrólito (polarização ativada).

Nos metais e nas ligas pode ocorrer a passivação, que é a oxidação controlada da superfície, que torna o metal inerte como os metais nobres. Isto anula a reatividade química dos metais e das ligas, reduzindo assim a corrosão.

O objetivo da maioria dos sistemas protetores é de reduzir a taxa de corrosão a um valor que seja tolerável ou que permita que o material alcance sua vida desejada. Apenas um número limitado de casos consegue proteger e eliminar completamente a corrosão [22,23,27].

### **a) Proteção por Barreira**

O conceito da proteção por barreira consiste na proteção do metal ao ambiente revestindo-o com uma barreira que resista a penetração de constituintes agressivos do ambiente. Dentre eles podemos destacar como revestimentos principais: revestimentos metálicos, inorgânicos e cerâmicos, orgânicos, inibidores, e revestimentos de conversão [23]. No capítulo 2.1 também foram apresentados alguns conceitos a respeito dos revestimentos metálicos, inorgânicos e orgânicos.

**Revestimentos Metálicos** - A ação protetora dos revestimentos metálicos contra a corrosão pode ser explicada por diversos fatores, tais como:

- a formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, pela reação com os oxidantes do meio corrosivo (caso do alumínio, cromo, níquel e zinco);
- os metais usados nos revestimentos apresentam valores mais elevados de sobretensão, sendo por isso mais resistentes ao ataque ácido em meios não-aerados (caso do estanho, chumbo, zinco e cádmio).

A impermeabilidade da película é uma condição essencial para que haja a proteção adequada e está intimamente ligada à qualidade dos métodos empregados nos revestimentos e na limpeza das superfícies metálicas.

Os revestimentos catódicos, em relação ao material revestido (substrato), devem ser perfeitamente livres de falhas porque, em presença de eletrólitos, forma-se uma pilha galvânica, ocorrendo rápida corrosão do material revestido, principalmente se existir pequena área anódica para grande área catódica. Como exemplos de revestimentos catódicos em relação ao aço-carbono têm-se o estanho, cobre, níquel, chumbo, prata e aço inoxidável.

Os revestimentos anódicos, em relação ao material revestido, não apresentam o problema dos revestimentos catódicos, pois se houver pequenas falhas no revestimento, o metal do revestimento será o ânodo da pilha, formada

em presença do eletrólito, protegendo assim catodicamente o material metálico base. Como exemplos de revestimentos anódicos têm-se o zinco e cádmio.

As técnicas mais frequentemente usadas para aplicação de revestimentos metálicos são: aspersão térmica, cladização, imersão a quente, eletrodeposição, cementação, deposição em fase gasosa e redução química [20].

### **2.2.8 Resistência a Corrosão – Aço Inoxidável**

O aço comum é uma liga formada por vários elementos químicos, tendo como principais componentes o ferro e o carbono, sendo conhecido como aço carbono. Ao adicionar-se no mínimo 11% de cromo ao aço carbono este aço torna-se resistente à corrosão, passando a ser chamado de aço inoxidável. Com a adição do cromo ao ferro ocorre o fenômeno da passivação, onde os elementos de liga presente no aço inoxidável reagem facilmente com o meio ambiente, criando um fino e aderente filme (óxido hidratado) que protege o material de ataques corrosivos [28, 29,30].

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em austeníticos, ferríticos e martensíticos:

**Austeníticos** – São aços mais nobres que contém de 12 a 30% de cromo mais 7 a 25% de níquel, são mais resistentes ao impacto e corrosão, não endurecidos por têmpera e amplamente empregados nas indústrias químicas, farmacêuticas, petroquímicas, alimentícias e naval dentre outras. Os aços inoxidáveis austeníticos mais utilizados segundo as classificações AISI/ABNT são 302,303, 304, 304L, 310, 316, 316L.

**Ferríticos** – São aços que podem conter de 12 a 30% de cromo aumentando o brilho e a aparência do aço, porém são endurecidos por têmpera e suas propriedades mecânicas são inferiores. São utilizados principalmente em partes externas de refrigeração, cuba, pias, talheres etc. São magnéticos em qualquer condição de trabalho. Segundo as classificações AISI/ABNT o mais utilizado é o 430.

**Martensíticos** – São aços que contém de 12 a 16% de cromo e 0,1 a 0,4% de carbono, aumentando assim sua capacidade de endurecimento por têmpera como em qualquer aço comum. É utilizado principalmente por cutelarias ou onde se faz necessária à resistência ao desgaste. Eles tornam efetivamente inoxidáveis após a têmpera e as propriedades mecânicas são otimizadas, são também magnéticos em qualquer situação de trabalho. Os mais empregados são os aços AISI/ABNT 410, 416 e 420.

### **2.2.9 Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**

O processo corrosivo ocorre entre as partes catódicas e anódicas de um sistema em reação, tendo por resultado uma corrente elétrica no metal e uma corrente iônica no eletrólito na relação metal-eletrólito. A quantidade de corrente produzida é uma medida da reação de oxidação ou de redução, fornecendo informações sobre a taxa do processo de corrosão [27]. Na figura 2.2.5 podemos

observar a varredura de potenciais aplicados a alguns ensaios, sobre uma curva de polarização genérica [2].

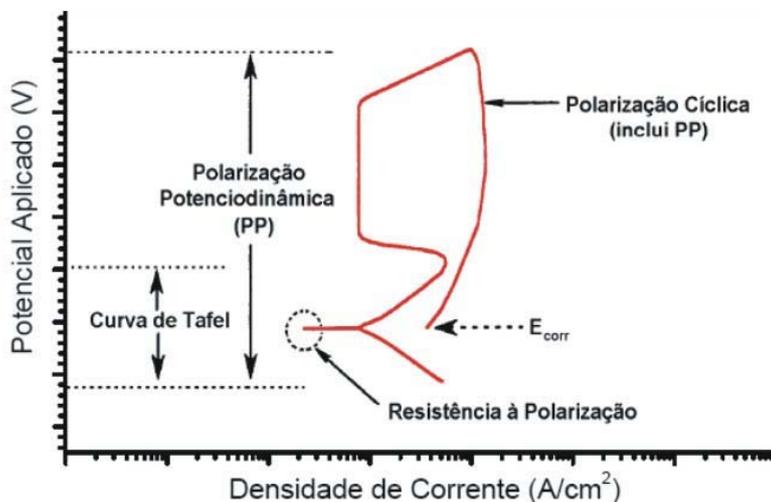


Figura 2.2.5 – Representação esquemática de uma curva de polarização com indicação de quatro técnicas eletroquímicas de ensaio de corrente contínua.

### a) Curvas de Tafel

Uma das aplicações de medidas de polarização consiste na determinação da densidade de corrente de corrosão usando a extrapolação das retas de Tafel [27]. O método de extrapolação da reta de Tafel, conhecido também como método de medição de corrosão de Tafel ou curvas de Tafel aplica um campo de varredura do potencial mais amplo (visualizado na figura 2.2.5) em relação ao método de resistência à polarização. Um arranjo de três eletrodos padrão utilizado em um ensaio de curvas de Tafel é apresentado de forma esquemática na figura 2.2.6 [2].

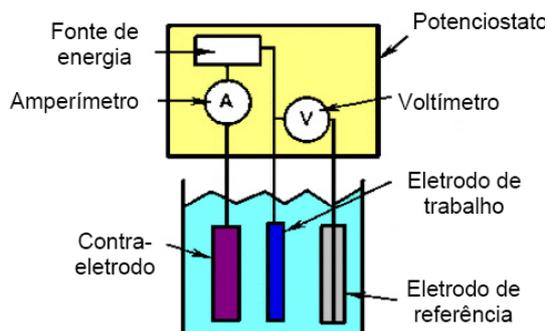


Figura 2.2.6 – Ilustração esquemática das configurações adotadas para o ensaio de curvas de Tafel, adaptado de [2].

Os dados de uma curva de Tafel são, portanto, também expressos como potencial versus o logaritmo dos valores de densidade de corrente, com a varredura da polarização ocorrendo dentro de  $\pm 250$  mV de  $E_{\text{corr}}$  com uma taxa de varredura entre 0,1 mV e 0,5 mV [2,32].

Através da interseção das linhas de extrapolação anódica e catódica junto a  $E_{\text{corr}}$  (ou  $E_{(i=0)}$ ) podemos estimar o valor da densidade de corrente ( $i_{\text{corr}}$ ) no processo de corrosão, conforme apresentado na figura 2.2.7 [2,27].

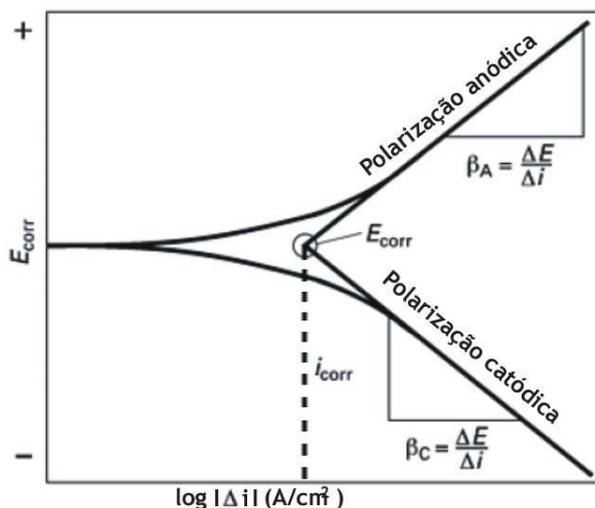


Figura 2.2.7 – Curva de Tafel apresentando modo de determinação de  $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$  e das constantes de Tafel ( $\beta_a$  e  $\beta_c$ ), adaptado de [27].

Uma das vantagens desse método é que, além da taxa de corrosão, ele permite determinar também a partir das retas de Tafel, os parâmetros  $\beta_a$  e  $\beta_c$ , ou seja, as inclinações (ou constantes) anódicas e catódicas de Tafel, respectivamente [36]. Essas constantes têm unidades de “Volts por década de densidade de corrente”, onde uma década representa uma ordem de grandeza na escala de  $i_{\text{corr}}$  (por exemplo,  $10^3$  para  $10^4$  A/cm²). Essas inclinações podem se associadas aos dados de ensaios de resistência à polarização na determinação dos valores de  $i_{\text{corr}}$  e, por conseguinte, de taxas de corrosão.

A forma real que uma curva de Tafel assume advém de como o processo de polarização é controlado, se por ativação ou por difusão (figura 2.2.8). A curva é classificada como controlada por ativação quando a taxa de corrosão é determinada pela velocidade em que um eletrodo metálico é capaz de transferir seus elétrons às espécies eletroquimicamente ativas do eletrólito (energia de ativação da reação). Uma característica do controle por ativação é o aumento da densidade de corrente com o aumento do potencial para ambos os ramos anódico e catódico e, neste caso, tanto um como outro ramo se tornam razoavelmente lineares a aproximadamente 50 e -50 mV a partir de  $E_{\text{corr}}$ , respectivamente.

Uma curva de Tafel é classificada como controlada por difusão quando é a taxa de difusão das espécies eletroquimicamente ativas quem determinam a taxa de corrosão. Teoricamente, um controle difusional faz com que a corrente (ideal)

referente ao ramo catódico se torne constante a  $\approx -50$  mV de  $E_{\text{corr}}$ . Entretanto, há curvas controladas por difusão cujas correntes (não-ideais) no ramo catódico aumentam levemente com uma grande variação do potencial (ou sobrepotencial), a partir de  $E_{\text{corr}}$ . Por este motivo, esta corrente catódica de variação lenta ou constante é considerada uma corrente limitada pela difusão [2].

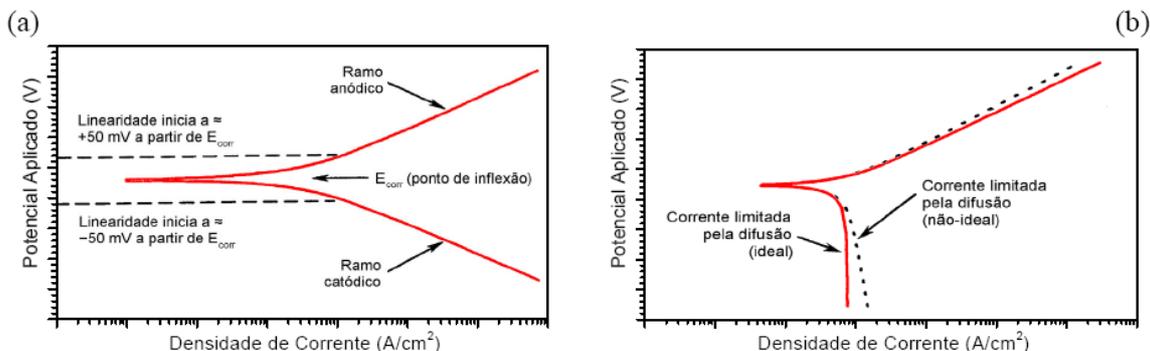


Figura 2.2.8 – Curva de Tafel para taxas de corrosão controladas por ativação, (a) e por difusão, (b), adaptadas de [2].

## b) Polarização Potenciodinâmica

As medidas de polarização são baseadas na aplicação de uma carga elétrica externa e os diversos métodos diferem entre si através de um pré-ajuste de um potencial ou de uma corrente controlados por um potenciostato. Os métodos utilizando potenciais constantes ou dependentes do tempo são chamados de potenciostáticos e potenciodinâmicos, respectivamente [32].

A técnica de polarização potenciodinâmica é usada geralmente para produzir um fotografia ou uma "impressão digital qualitativa" de uma substância em uma solução (eletrólito) aplicada [27]. Essa técnica detecta também toda a tendência da substância em passar-se relacionando o estudo da corrosão ao comportamento ativo-passivo de um material, ou seja, às condições que levam o material a se corroer (comportamento ativo) ou a não se corroer (comportamento passivo). O ensaio potenciodinâmico envolve uma varredura do potencial aplicado ao eletrodo de trabalho medindo a corrente gerada, que representa a quantidade de íons liberada pelo material durante a sua corrosão.

A representação dos dados obtidos num gráfico de potencial contra logaritmo da densidade de corrente fornece a curva de polarização. As curvas de polarização possuem muitas aplicações no estudo do comportamento dos materiais frente à corrosão, tendo-se como exemplo a utilização das curvas na avaliação do desempenho de inibidores de corrosão.

Em uma curva de polarização é possível observar os comportamentos que um material pode assumir durante polarizações anódicas ou catódicas, realizadas sob diferentes condições. Os comportamentos mais comuns que um material pode apresentar na polarização anódica são: dissolução ativa, passivação e corrosão por pite (transpassivação) [33].

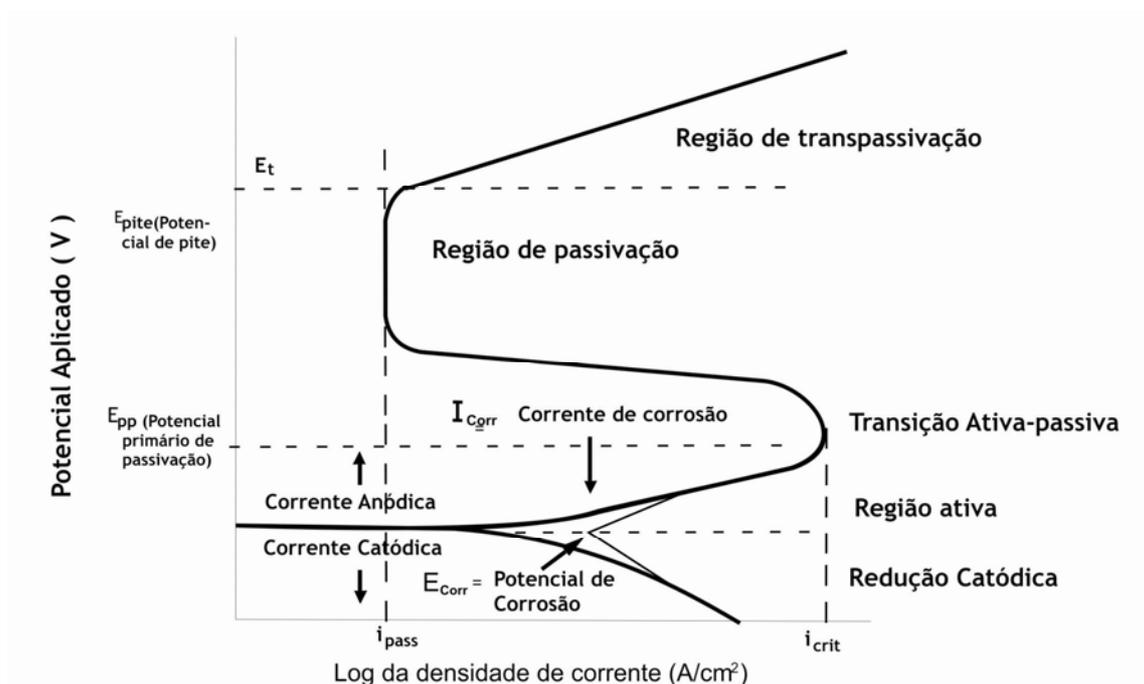


Figura 2.2.9 – Características de corrosão de um metal ativo-passivo dependendo da energia de oxidação, adaptado de [22,35].

A figura 2.2.9 descreve um ensaio potenciodinâmico teórico onde inicialmente aplica-se um potencial negativo (potencial de redução) em relação ao valor obtido no ensaio de circuito aberto ( $E_{corr}$ ), com conseqüente redução da superfície do material; aumentando o potencial, alcança-se o valor de equilíbrio de  $E_{corr}$ , onde a corrente de corrosão é nula. Aumentando ainda o potencial aplicado, entra-se na região ativa, onde a corrente anódica (constituída por íons liberados) aumenta com o potencial (potencial de oxidação); o filme passivo, que está se formando nos materiais que têm esse comportamento, torna-se estável alcançando certo valor do potencial, causando a redução da corrosão à valores bem menores (a corrente alcança, na região passiva, valores até  $10^6$  vezes menores, e por isso é necessária uma escala logarítmica no gráfico). Aplicando um potencial maior, o filme recém formado quebra-se, aumentando novamente a corrente anódica (transpassivação ou corrosão por pite) [22].

A partir da curva de polarização anódica verifica-se condições de potencial nas quais determinado eletrodo sobre dissolução dita ativa, se encontra passivo ou sofre corrosão localizada, sendo possível determinar valores característicos tais como o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), o potencial primário de passivação ( $E_{pp}$ ), o potencial de pites ( $E_{pite}$ ), o potencial da região de transpassividade ( $E_t$ ), a corrente de passivação ( $i_{pass}$ ) e a corrente de transição ( $i_{crit}$ ) [31,33,34,35].

A avaliação dos parâmetros de corrosão é realizada de forma comparativa:

- Menor largura e intensidade do pico Transição Ativa-Passiva, maior tendência e rapidez a passivar-se;

- Menor  $i_{\text{pass}}$  e maior  $E_{\text{pite}}$ , maior grau de proteção e estabilidade do filme passivo;
- Maior  $(E_{\text{pite}} - E_{\text{pp}})$  ou menor  $(E_{\text{pite}} - E_{\text{corr}})$ , menor resistência à corrosão localizada.

Dentre outras técnicas eletroquímicas podemos citar os ensaios de Polarização Cíclica, Amperometria de Resistência Nula, Câmara de Névoa Salina (Salt Spray), Medição de Impedância, Monitoração do Potencial de Corrosão ( $E_{\text{corr}}$  vs  $t$ ) e Resistência à Polarização.

### **2.3 ASPERSÃO TÉRMICA**

### 2.3.1 Fundamentos do Processo e Definição

Normalmente, qualquer material que não se vaporize, sublime, dissocie ou se decomponha, pode ser aspergido termicamente. Isso faz com que um grande número de materiais metálicos e não-metálicos possam ser depositados através do processo de Aspersão Térmica, “Thermal Spray”.

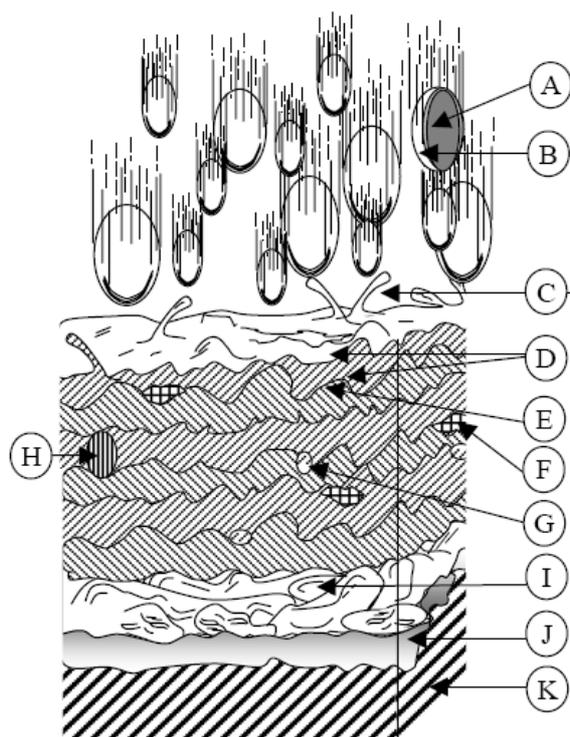
Um revestimento aspergido termicamente consiste, sobretudo, em uma deposição produzida por um processo em que as partículas fundidas ou semifundidas são dirigidas a um substrato, apresentando características distintas conforme o processo utilizado [12].

Podemos então definir a Aspersão Térmica como sendo um termo genérico para uma variedade de processos em que materiais tais como metais, ligas, cerâmicos, compósitos e poliméricos na forma de pó, arame ou vareta são alimentados em uma tocha sendo então aquecidos próximo ou um pouco acima de seu ponto de fusão. As partículas fundidas ou quase semifundidas resultantes do material são aceleradas através de um jato de gás, geralmente ar comprimido, e projetadas de encontro à superfície a ser revestida, ou seja, o substrato (figura 2.3.1).



Figura 2.3.1 – Processo de aspersão térmica aplicado para proteção contra corrosão.

Durante o impacto, as partículas adquirem uma estrutura de lamelas finas que aderem à superfície, sobrepondo-se e bloqueando-se umas às outras enquanto solidificam, conforme visualizado na figura 2.3.2. A espessura revestida total é geralmente função da aplicação de múltiplas aplicações ou “passadas” do dispositivo de revestimento (pistola) [13].



- A: seção de uma partícula com seu interior ainda em estado fundido;  
 B: camada de óxido formada durante o "voo";  
 C: respingo da partícula depositada;  
 D: óxido formado na superfície;  
 E: adesão interlamelar formada por deposição individual do material;  
 F: liga formada por duas partículas;  
 G: poros ou vazios formados por gases aprisionados;  
 H: partícula não-fundida;  
 I: lamelas individuais, as quais formam camadas individuais;  
 J: desprendimento da camada;  
 K: substrato.

Figura 2.3.2 – Secção típica de um revestimento depositado por aspersão térmica, adaptado de [12].

Uma das principais vantagens do processo de aspersão térmica consiste na ampla faixa de materiais que podem ser utilizados na aplicação do revestimento. Uma outra vantagem é a capacidade da maioria dos processos de aspersão térmica de aplicar um revestimento sobre um substrato sem aquecê-lo significativamente. Dessa maneira, materiais com pontos de fusão muito elevados podem ser aplicados a uma grande variedade de peças sem a necessidade de um pré-aquecimento, evitando mudança nas propriedades e deformações térmicas na peça. Uma terceira vantagem é a capacidade, na maioria de casos, de retirar-se o revestimento e aplicar um novo revestimento em superfícies desgastadas ou danificadas sem mudar as propriedades ou as dimensões da peça. Podem ser citadas como vantagens também a elevada taxa de deposição obtida e a portabilidade do equipamento, tornando possível, com algumas restrições, a aplicação em campo do revestimento. Uma desvantagem natural consiste em

limitações dimensionais que inviabilizam a aplicação do revestimento, como, por exemplo, cavidades [3,5,12, 13].

### **2.3.2 – Histórico do Desenvolvimento do Processo de Aspersão Térmica**

As primeiras evidências da descoberta e patentes do processo de Aspersão Térmica datam de 1882 a 1889 [6], onde um jovem inventor suíço chamado Dr. Max Ulrich Schoop (Zurique, Suíça) após observar seu filho se divertindo com um canhão de brinquedo, percebeu que os disparos de chumbo que eram projetados aderiam em qualquer superfície, extraindo então a idéia de que um metal poderia ser fundido e projetado sob uma forma pulverizada (spray), construindo-se assim uma superfície deste material. [12]

Foi desenvolvido pelo Dr. Schoop um equipamento (pistola), o qual utilizava gases oxigênio e acetileno como fonte de aquecimento e ar comprimido para projetar o material fundido (figura 2.3.3), material este desenvolvido inicialmente sob a forma de arame.



Figura 2.3.3 – Dr. Schoop in 1914 e seu primeiro dispositivo de aspersão térmica operada eletricamente, adaptado de [12].

Com o desenvolvimento dos processos, as pistolas foram sendo modificadas e passaram a existir modelos que poderiam funcionar utilizando o material na forma de pó.

Em meados de 1908, o Dr. Schoop patenteou o processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico, processo este que proporcionou a deposição de metais na forma de arame como aço, aço inoxidável e zinco, com o objetivo inicial de prevenir a corrosão de estruturas, dando início à “Indústria de Metalização” [6].

O processo de metalização passou a ser desenvolvido nos Estados Unidos por Rae Axline, George Lufkin e Herb Ingham, formando posteriormente a “METCO INCORPORATED”, em 1933 que continuando com o desenvolvimento passou a produzir equipamentos de metalização usados principalmente para a proteção contra corrosão e recuperação de elementos de máquinas desgastados.

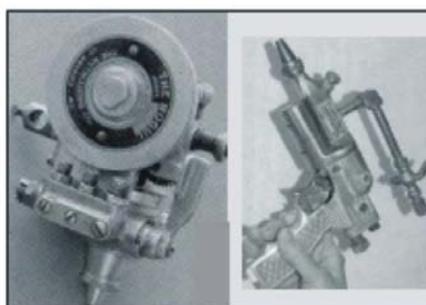
Em 1939 foi criada a METCO Ltd (UK), responsável pela distribuição dos produtos METCO no Reino Unido e Irlanda.

Ao lado da METCO Incorporated, o grupo Perkin Elmer iniciou o SULZER METCO PERKIN ELMER GROUP em 1971, tornando-se distribuidor mundial de equipamentos de aspersão térmica.

A evolução também se deu quanto ao tipo de material depositado (pó, arame ou vareta) e também quanto às formas de aquecimento, conforme visualizado na figura 2.3.4, sendo introduzido em 1988, pela METCO, o sistema Diamond JET HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).



**METCO 2E (1950)**  
Pistola de Metalização com Bicos



**MOGUL " DOT", Weld Pistol (1960)**



**Pistola para aspersão (pó) SHORI Pistol , (1948)**



**MULTIPLEX METAL,**  
Pistola de aspersão da Britton Company



**Pistola para aspersão (Arame), Valentine Metal Gun**



**Pistola para aspersão (Arame), METALIGESELLSHAFT AG**

Figura 2.3.4 – Evolução das pistolas de aspersão térmica de 1940 a 1960, adaptado de [12].

Paralelamente ao desenvolvimento da Metco Incorporated, no cenário internacional, a expansão significativa dessa nova tecnologia só ocorreu após o término da II Gerra Mundial, quando processos de aspersão utilizando pó e processos a plasma foram desenvolvidos e introduzidos. O princípio básico de operação não mudou, mas muitos avanços no processo foram realizados desde então.

Anteriormente, em 1939, Reinecke introduziu o primeiro processo de revestimento a arco plasma.

Como citado, a tecnologia dos equipamentos de aspersão cresceu a partir dos anos 50 com os processos de combustão a chama a arco elétrico e plasma sendo desenvolvidos e crescendo paralelamente, mas com avanços distintos.

O processo conhecido como D'Gun (Detonatin Gun) e tecnologias de arco plasma mais desenvolvidas foram introduzidas e emergendo-se no início dos anos 70 como sendo os processos de mais alta tecnologia usados largamente desde então.

A figura 2.3.5 resume a evolução dos processos de Aspersão Térmica, suas aplicações e materiais utilizados.

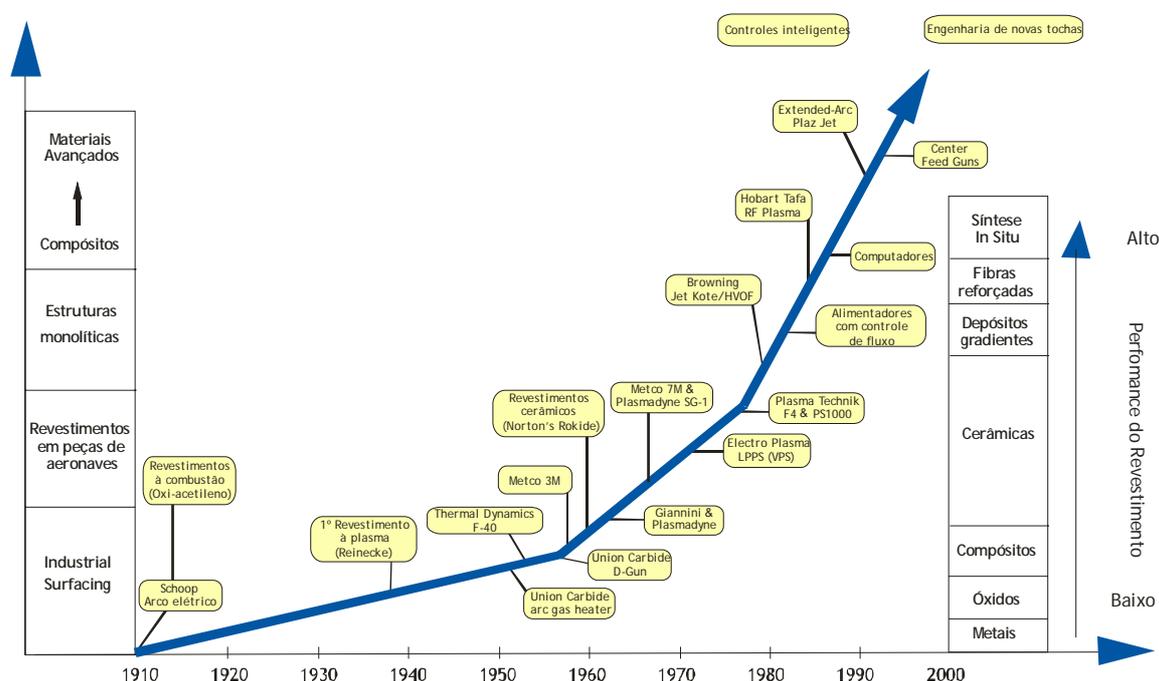


Figura 2.3.5 – Evolução dos processos de aspersão térmica, aplicações e materiais, adaptado de [6].

### 2.3.3 – Classificação e Processos de Aspersão Térmica

Os processos de Aspersão Térmica são classificados conforme o tipo de energia térmica utilizada na fusão do material de revestimento [37] sendo tipicamente agrupadas em três categorias principais [6]: Elétrico (Electric Arc Spray); Combustão (Flame Spray) e Plasma (Plasma Arc Spray).

Há também os processos que utilizam como meio de aquecimento a Emissão de Fótons (Laser Spraying) e ainda o processo de aspersão térmica que apresenta como fonte de aquecimento a energia cinética das partículas, denominado Aspersão Térmica a frio (Cold Spraying) [2]:

Os processos a combustão são ainda subdivididos em: Aspersão Térmica a Chama Oxi-Gás na forma de Pó (Flame Powder); Aspersão Térmica a Chama Oxi-Gás na forma de Arame (Wire Flame); Aspersão Térmica a Chama de Alta Velocidade com Material de Adição na forma de Pó (High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying, HVOF); Aspersão Térmica a Chama de Alta Velocidade com Material de Adição na forma de Arame (High Velocity Combustion Wire Flame Spraying, HVCW); Aspersão Térmica por Detonação (Detonation-Gun Spraying, D-Gun).

Já os processos a Arco Plasma são subdivididos em: Plasma de Arco não Transferido (Air Plasma Spraying, APS); Plasma de Arco Transferido (Plasma Transferred Arc, PTA).

### 2.3.3.1 Aspersão Térmica a Arco Elétrico

O processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico utiliza como material de revestimento dois arames metálicos. Os dois arames são carregados eletricamente com polaridades invertidas e alimentados em uma pistola de aspersão em velocidades controladas [38], sendo um arame positivo (ânodo) e o outro negativo (cátodo), aplicando-se uma diferença de potencial entre 18 e 40 Volts [7].

Os arames depositados apresentam diâmetros que variam entre 1,2 a 5 mm e permitem também a operação com uma variedade de materiais, puros ou ligados (sólidos e tubulares) [35].

Quando os arames aproximam-se do ponto de contato ocorre a abertura de um arco elétrico gerando-se calor suficiente para fundir continuamente as extremidades dos arames. Utiliza-se também um jato de ar comprimido para atomizar o material que se encontra no estado fundido, acelerando-o à superfície do substrato para dar forma ao revestimento, conforme visualizado na figura 2.3.6 [33]. Em aplicações especiais, onde seja necessário um controle da atmosfera, podem ser utilizados gases inertes como argônio e hélio com o objetivo de redução da oxidação do revestimento, em substituição ao ar comprimido [7].

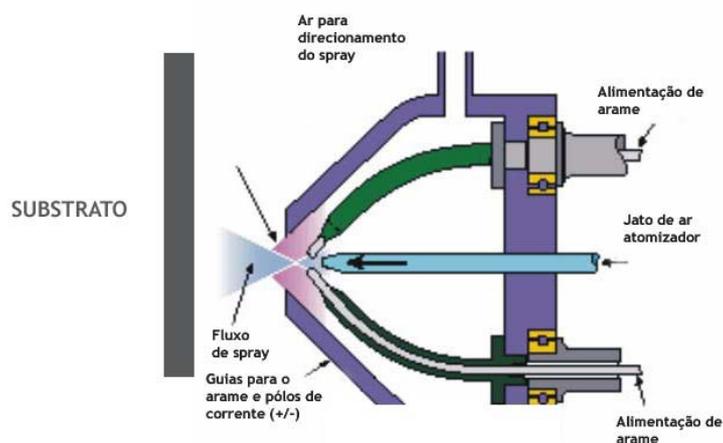


Figura 2.3.6 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico, adaptado de [39].

Na aspersão a arco elétrico, a quantidade de material que pode ser depositada por unidade de tempo é função do poder elétrico (corrente) do sistema e da densidade e ponto de fusão do arame [38].

Um aumento da diferença de potencial entre os arames proporciona partículas com dimensões maiores e também um comprimento de arco maior.

Para a obtenção de revestimentos mais densos e de melhor acabamento, a diferença de potencial deve ser mantida em valores mínimos que sejam compatíveis com a estabilidade do arco [39].

O arco elétrico gerado apresenta temperaturas entre 4000 a 6000°C [39] excedendo o ponto de fusão dos materiais utilizados e a energia elétrica neste processo situa-se entre 5 a 10KW [7].

A velocidade de projeção das partículas chega a 250m/s e uma unidade de controle possibilita a regulação de parâmetros do processo como velocidade de alimentação do arame, suprimento de ar comprimido, corrente e tensão [35].

Durante o ciclo de fusão, o metal aspergido é superaquecido até um ponto onde pode ocorrer volatilização parcial, especialmente com alumínio e zinco. Devido às elevadas temperaturas das partículas, após o impacto com o substrato, são produzidas zonas de difusão e de interação metalúrgica. Estas reações formam pequenas zonas “soldadas”, levando a um revestimento com boa resistência adesiva e coesiva [7].

O processo de Aspersão Térmica a Arco Elétrico apresenta vantagens como camadas mais densas e mais resistentes comparadas ao processo à combustão, baixo custo, alta taxa de deposição e eficiência, permitindo o revestimento de grandes áreas e alto volume de produção [8, 35].

Este processo apresenta limitações como a utilização unicamente de arames eletricamente condutores, a utilização de aquecedores externos quando há a necessidade de pré-aquecimento [38] e elevada tendência de mudança na composição química das ligas depositadas devido à oxidação ou à vaporização, ou ainda à ocorrência simultânea desses dois fenômenos [7].

Este processo, por apresentar a taxa de deposição mais elevada dentre os processos de aspersão térmica pode ser utilizado para revestir peças de grandes dimensões e também um grande número de componentes em uma linha de produção em série.

Algumas aplicações típicas incluem o revestimento de estruturas tais como pontes e fabricações “offshore” utilizando o zinco e o alumínio para dar proteção contra a corrosão, recuperação de elementos de máquinas tais como rolamentos e eixos, utilizando ligas de aço e bronze e também o revestimento de carcaças de componentes eletrônicos com cobre, zinco e alumínio, fazendo com que esses revestimentos condutores forneçam proteção da interferência eletromagnética [39]. A figura 2.3.7 apresenta uma tocha de aspersão térmica a arco elétrico.



Figura 2.3.7 - Tocha de aspersão térmica a arco elétrico, de [38].

#### **2.3.4 – Preparação da Superfície**

Para assegurar a adequada ligação dos revestimentos com o substrato, é necessário que a superfície do substrato esteja adequadamente preparada [13], antes da aplicação da camada de revestimento.

O principal mecanismo de aderência do revestimento com substrato é a ancoragem mecânica, obtida através de tratamento mecânico da superfície do substrato, como jateamento, ou de tratamento químico do tipo decapagem com ácido apropriado, gerando a textura necessária à melhor ancoragem do revestimento. A qualidade da ancoragem é fator essencial a uma boa adesão do revestimento com o substrato [7].

Naturalmente, a superfície deve permanecer isenta de lubrificantes, óleos, graxas e gorduras provenientes do processo de fabricação ou do manuseio posterior, bem como de óxidos de reação com o ambiente. Assim que a superfície estiver preparada, recomenda-se a imediata aplicação do revestimento, para prevenir oxidação ou contaminação da superfície [13].

#### **2.3.5 – Materiais de Adição**

A seleção do material para o revestimento a ser aspergido é baseada no material do substrato e das características desejáveis da proteção a ser aplicada. Os vários tipos de revestimentos disponíveis para a aplicação industrial são agrupados de conformidade com suas características físicas e podem ser classificados como [5]:

- **Revestimentos Metálicos** - A maioria dos metais e ligas metálicas podem ser utilizados como materiais de adição no processo de deposição a aspersão térmica, incluindo o tungstênio, molibdênio, nióbio, ligas especiais, zinco, alumínio, bronze, aços médio carbono e inoxidáveis, ligas de NiCr, ligas a base de cobalto (Stellites), ligas a base de cobalto e níquel (Triballoys), e ligas de NiCrBSi. As ligas

metálicas aspergidas termicamente apresentam vantagens devido a sua similaridade a muitos materiais metálicos onde se faz necessário resistência mecânica, restaurações dimensionais, resistência ao desgaste e à corrosão. As aplicações incluem revestimentos de cilindros de motores de diesel, anéis de pistão ou hastes de válvula, lâminas, aletas, e câmara de combustão de turbinas, proteção de pontes, bombas e válvulas petroquímicas, equipamentos agrícolas e de mineração, dentre outras [6].

- **Revestimentos Cerâmicos** - A maioria dos materiais cerâmicos podem ser aspergidos termicamente, incluindo os óxidos metálicos tais como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  estabilizada,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , e  $\text{MgO}$ , carbetos tais como  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ , e  $\text{SiC}$ , nitretos como  $\text{TiN}$  e  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Os depósitos aspergidos destes materiais são usados para fornecer resistência ao desgaste ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ , e  $\text{TiN}$ ), para proteção térmica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , e  $\text{MgO}$ ), isolamento elétrico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , e  $\text{MgO}$ ), e resistência à corrosão. O processo a arco plasma é o processo mais apropriado para a aplicação de materiais devido a elevada temperatura do jato [6].

- **Revestimentos Poliméricos** - Os polímeros também podem ser depositados com sucesso, desde que sejam aplicados com algumas particularidades. A aspersão térmica de polímeros é praticada comercialmente desde os anos 80, e um número crescente tem sido utilizado, incluindo uretanos, álcoois de vinil do etileno (EVAs), nylon 11, politetrafluoroetileno (PTFE), tetrafluoroetileno (ETFE), polimetilmetacrilato (PMMA), policarbonatos, e copolímeros tais como poliamido, Surlyn (DuPont), e fluoreto do polivinilideno (PVDF) [6].

- **Revestimentos com Materiais Compósitos** - Revestimentos de compósitos reforçados resistentes ao desgaste tais como  $\text{WC/Co}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ , e  $\text{TiC/NiCr}$  são as aplicações mais comuns e constituem um dos maiores campos de aplicações dos processos de aspersão térmica [6].

### **2.3.6 – Aplicações**

- **Resistência ao desgaste** – Uma das mais importantes aplicações dos revestimentos metálicos por aspersão térmica é na obtenção de resistência ao desgaste. Nesta aplicação, são utilizados revestimentos para resistir a todos os mecanismos de desgaste, abrasivo, erosivo, e adesivo. Os materiais aplicados vão desde metais macios, passando por ligas duras, compósitos e até carbetos baseados em óxidos, com elevada resistência mecânica. Geralmente, a resistência ao desgaste proporciona o aumento da densidade e força coesiva dos revestimentos. Ligas de Commalloy e Stylite, por exemplo, são aplicadas em eixos de bombas, de redutores e de centrífugas onde se faz necessário um aumento da resistência mecânica para prevenir a ocorrência de desgaste por abrasão [7, 13].

- **Resistência contra a corrosão** - Diversos materiais como o zinco, alumínio, aços inoxidáveis, bronze, ligas duras, carbonetos e cerâmicas, além de alguns polímeros, aplicados pelo processo de aspersão térmica são utilizados para a

proteção contra a corrosão. Os revestimentos de zinco e alumínio são usados freqüentemente em pontes, em navios, e em outras estruturas metálicas próximas a ambiente marinho. Outros revestimentos aspergidos fornecem resistência à corrosão e ao desgaste. Uma restrição nos processos de aspersão térmica consiste na porosidade inerente aos revestimentos, em especial os poros interconectados, sendo extremamente críticos quando os revestimentos são expostos a um eletrólito corrosivo, tornando-se necessário o controle adequado do processo de revestimento e o uso de tratamentos posteriores como selagem. A aplicação de revestimentos resistentes à corrosão é realizada em peças como carcaças e eixos de bombas que se encontrem em atmosferas agressivas devido ao meio de trabalho [7,13,27].

### 2.3.7 – Comparações entre os Processos de Aspersão Térmica

Os variados processos de Aspersão Térmica apresentam características e aplicações distintas. A tabela 2.3.1 apresenta uma comparação entre alguns dos processos de aspersão térmica descritos anteriormente [6,12,13].

PROCESSO	FONTE DE CALOR	PROPULSOR (ATOMIZADOR)	FLUXO DE GÁS (m <sup>3</sup> /h)	MATERIAL DE ALIMENTAÇÃO	TEMPERATURA DA CHAMA ( °C)	VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS (m/s)	MATERIAIS DE REVESTIMENTO
CHAMA (PÓ)	Combustão	Ondas de choque da detonação	(Combustão) 11	Pó	3.300	30	Metálicos, cerâmicos e revestimentos fusíveis
CHAMA (ARAME)	Combustão	Ondas de choque da detonação	(Combustão) 71	Arame	3.300	180	Metálicos
ARCO ELÉTRICO	Descarga elétrica	Ar	71	Arame	6.000	240	Metálicos
HVOF	Combustão	Ondas de choque da detonação (combustão)	28-57	Pó	4.500	610 - 1.060	Metálicos, compostos, algumas cerâmicas
PLASMA	Descarga elétrica	Gás inerte	4,2	Pó	16.000	240	Metálicos, compostos, algumas cerâmicas e poliméricos
DETONATION GUN	Combustão	Ondas de choque da detonação	(Combustão) 11	Pó	4.500	910	Metálicos, compostos, algumas cerâmicas

PROCESSO	FORÇA DE COESÃO DAS PARTÍCULAS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (ADERÊNCIA) Mpa	POROSIDADE (% VOLUME)	CUSTO RELATIVO ENTRE PROCESSOS (b)	TAXA DE DEPOSIÇÃO MÁXIMA (Kg/h)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA NECESSÁRIA PARA FUSÃO kW/KG
CHAMA (PÓ)	Baixa	20-28	10-20	3	7	25-75	11-22
CHAMA (ARAME)	Média	20-28	10-20	3	9	50-100	11-22
ARCO ELÉTRICO	Elevada	40-60	8-15	1	16	4-6	0,2-0,4
HVOF	Muito Elevada	> 70	0,1-1	5	14	100-270	22-200
PLASMA	Elevada	30-70	2-5	5	5	30-80	13-22
DETONATION GUN	Muito Elevada	> 70	0,1-1	10	1	100-270	220

Tabela 2.3.1 - Comparação entre processos de aspersão térmica, adaptado de [6,12,13].

**2.4 PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO  
ATRAVÉS DE REVESTIMENTOS  
DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**

### **2.4.1 Introdução**

Para muitos materiais, e em muitas situações de aplicação, onde existe a necessidade da adoção de um método de controle de corrosão, algumas características como as propriedades mecânicas, suas disponibilidades e as exigências econômicas, inerentes ao ambiente de trabalho ao qual esse material se destinará, deixam de ser o ponto de partida para na seleção do material, sendo mais importante considerar suas características de resistência à corrosão [2,8].

Para tais materiais, que necessitam do controle quando aplicados em meio corrosivos, pode-se adotar três processos principais de controle de corrosão:

- Modificação do ambiente ao qual o material é exposto;
- Utilização de métodos elétricos de controle;
- Uso de revestimentos protetores, metálicos e não-metálicos.

A aplicação de revestimentos metálicos como proteção de chapas de aço carbono submetidas a meio corrosivo é o objeto deste estudo.

### **2.4.2 Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica para a Proteção contra a Corrosão**

Os revestimentos aspergidos termicamente são utilizados extensamente para impedir a corrosão de materiais, proporcionando também frequentemente benefícios adicionais das propriedades como a resistência ao desgaste. Isso se deve a ampla faixa de materiais que podem ser depositados, e podem ser divididos em três grupos principais:

- Revestimentos Anódicos
- Revestimentos Catódicos
- Revestimentos Neutros

A figura 2.4.1 apresenta em um fluxograma uma seqüência de análise estabelecendo a forma de proteção oferecida ao substrato metálico em função do revestimento [2,8].

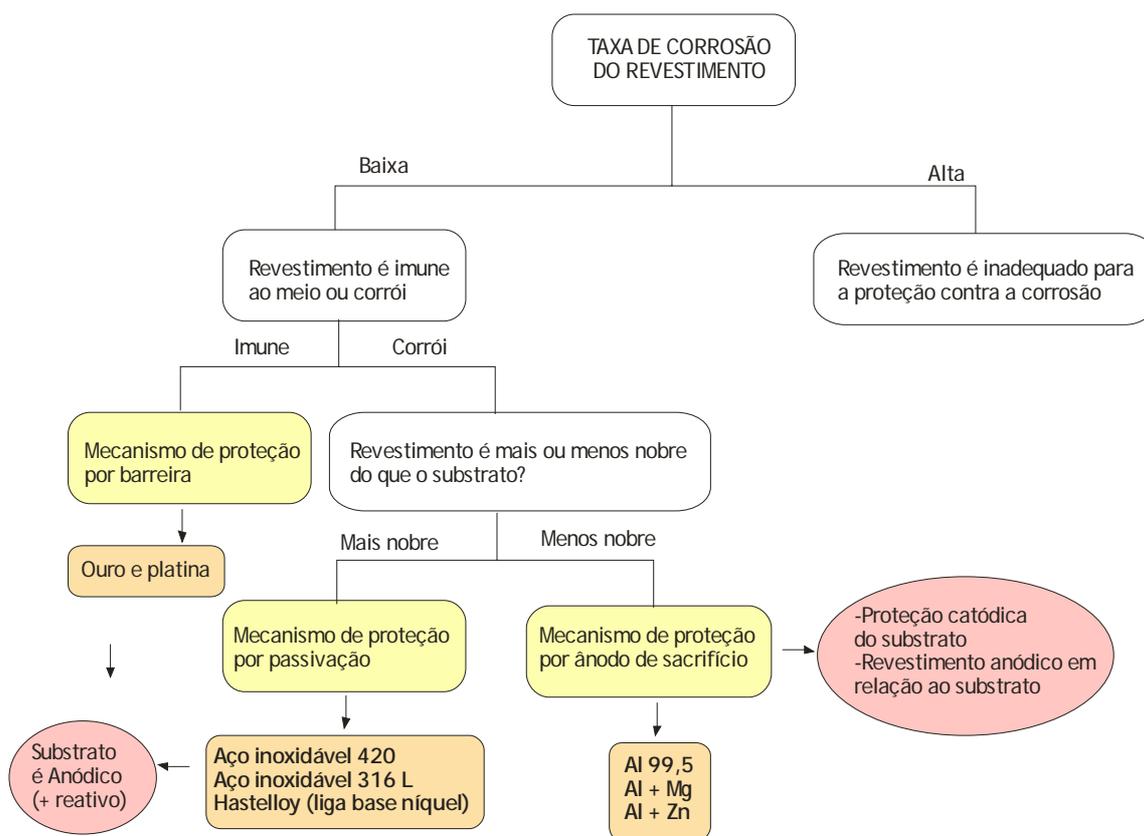


Figura 2.4.1 - Fluxograma apresentando seqüência de análise estabelecendo a forma de proteção oferecida ao substrato em função das características do revestimento metálico, adaptado de [2].

## Revestimentos Anódicos

Os revestimentos anódicos para a proteção de substratos em ferro fundido e aço são limitados quase que inteiramente a revestimentos de zinco, alumínio, ou suas ligas com a inclusão também do magnésio. Esses revestimentos, anódicos em relação ao substrato, proporcionam a proteção conhecida como proteção catódica do substrato ou proteção por ânodo de sacrifício.

Os mecanismos de proteção desses revestimentos podem ser agrupados em duas classes:

Proteção catódica do substrato ou proteção por ânodo de sacrifício;  
Proteção por barreira ao ambiente.

Um revestimento de zinco ou alumínio, embora poroso, protege o substrato do ambiente, fornecendo a proteção catódica. Para casos onde seja necessário aumentar a vida útil do sistema, a porosidade pode ser selada com a utilização de seladores orgânicos ou pintando-se o revestimento.

A selagem ou a pintura dos revestimentos podem em contrapartida reduzir o efeito catódico de proteção diminuindo a eficácia total devido à redução da área de contato do revestimento com o ambiente. O efeito de barreira também protege a vida útil do revestimento, não sendo também aplicável a todas as situações.

Dependendo da escolha do sistema e do ambiente a expectativa de vida útil do revestimento poderá durar cerca de vinte anos sem a necessidade de qualquer manutenção. Este método fornece proteções superiores à galvanização, eletro galvanização e pintura sem custos muito elevados [8].

### **Revestimentos Catódicos**

Os revestimentos catódicos são aqueles nos quais, um metal que seja catódico com relação ao substrato é aplicado para fornecer o revestimento. Ligas de aço inoxidável e ligas a base de níquel (por exemplo, Hastelloy) possibilitam uma boa proteção e seu mecanismo de proteção se dá por passivação.

Para os materiais catódicos há uma ampla faixa que pode ser usada para revestimentos, partindo desde o aço inoxidável até materiais como o tântalo para proteção em ambientes corrosivos mais extremos. Entretanto, uma limitação desses revestimentos se deve ao fato de que devem fornecer uma barreira completa ao substrato no ambiente em que este estará exposto.

Caso o substrato seja exposto ao ambiente corrosivo, seu desgaste por corrosão será acelerado resultando no desprendimento do revestimento. Para evitar tais danos, é recomendada a selagem desses revestimentos e ainda a utilização de processos de revestimentos mais densos como HVOF, plasma e ligas fusíveis, os quais fornecerão uma proteção mais eficiente [8].

### **Revestimentos Neutros**

Revestimentos neutros cerâmicos tais como alumina ou óxido de cromo fornecem uma excelente resistência contra corrosão na grande maioria dos ambientes corrosivos pela exclusão desse ambiente ao substrato.

Os revestimentos neutros normalmente não aceleram o processo de corrosão do substrato mesmo que o revestimento apresente permeabilidade, com exceção de materiais onde a exclusão do oxigênio poderá provocar a corrosão por fenda (revestimentos de aço inoxidável), embora toda a corrosão entre o substrato e o revestimento deva ser evitada para impedir a separação. Neste caso também é recomendada a selagem dos revestimentos e utilização de processos que apliquem revestimentos mais densos como é o caso do arco plasma [8].

### **3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### 3.1 Materiais de Revestimento

Para desenvolvimento do trabalho experimental, os materiais utilizados como revestimentos para proteção contra a corrosão e desgaste foram o aço inoxidável austenítico AISI 316L e o aço inoxidável martensítico AISI 420.

Antes da aplicação dos revestimentos de aço inoxidável foi depositada uma camada base (revestimento de Ni-4Al) na superfície preparada do substrato com a função principal de fornecer ancoramento mecânico, visto que este corresponde a um dos principais mecanismos de adesão entre o substrato e o revestimento de aço inoxidável a ser depositado.

Foram produzidos também, separadamente, corpos de prova do revestimento de Ni-4Al para análise comparativa aos revestimentos de aço inoxidável.

Os materiais foram utilizados na forma de arame com 1,6mm de diâmetro e combinados conforme apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Aplicação de Arames.

Revestimento	Arames
Base Ni-4Al (para todos revestimentos)	2 arames Ni-4Al
Aço Inoxidável AISI 316L	2 arames AISI 316L
Aço Inoxidável AISI 420	2 arames AISI 420
Aço Inoxidável AISI 420+316L	1 arame AISI 316L + 1 arame AISI 420

A composição química dos arames utilizados, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição Química dos Arames Utilizados (%).

#### Base Ni-4Al (Fabricante TAFA, Concord, USA)

C	Ni	Al	Mn	Cu	Ti	Co	S	Si
0,190	93,49	5,04	0,24	< 0,01	0,60	0,01	0,001	0,41

#### Revestimento Aço Inoxidável 316L (Fabricante Kestra)

C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
0,014	18,1	0,07	1,85	2,61	12,49	0,017	0,008	0,5

#### Revestimento Aço Inoxidável 420 (Fabricante Kestra)

C	Cr	Mn	Ni	Ti	P	S	Si
0,35	12,2	0,45	0,27	0,24	0,023	0,04	0,55

### 3.2 Produção dos Corpos de Prova e Preparação Metalográfica

O aço SAE/ABNT 1010 foi utilizado como substrato e sua composição química é apresentada na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição Química do Substrato (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Nb	Fe
0,08	0,01	0,58	0,023	0,007	0,02	0,01	0,01	0,002	0,021	99,21

As dimensões dos corpos de prova produzidos são apresentadas na tabela 3.4 para cada tipo de ensaio respectivamente.

Tabela 3.4 – Dimensões dos Corpos de Prova.

Ensaio	Dimensões
Microscopia Ótica e de Varredura	10 x 10 x 3 mm
Desgaste	Ø 8 x 18 mm
Corrosão e demais ensaios	50 x 50 x 3 mm

Todos os corpos de prova foram jateados com partículas de alumina ( $Al_2O_3$  – faixa granulométrica de 20 a  $40\mu m$ ) a 200 mm de distância, pressão de  $6\text{ Kgf/cm}^2$  e vazão de  $170\text{m}^3/\text{h}$ , obtendo-se uma rugosidade  $R_a$  média de  $8,500\mu m$ , imediatamente antes da operação de revestimento.

Os revestimentos foram sempre depositados logo após a operação de jateamento, objetivando minimizar o efeito degradativo de uma possível re-oxidação da superfície recém-preparada.

A preparação metalográfica das amostras para a análise por microscopia ótica (MO) consistiu em embutimento a quente da amostra em prensa Arotec modelo Pré 30Mi com resina do tipo baquelite. A amostra foi posicionada para a análise de sua secção transversal.

O lixamento manual foi realizado em operação seqüenciada com papéis abrasivos de granulometria 180, 320, 400, 600 e 1200, seguidos de polimento manual utilizando-se pastas de diamante de 3, 1 e  $0,25\mu m$ .

### 3.3 Aspersão Térmica – Equipamento e Parâmetros de Processo

Os revestimentos foram aspergidos termicamente através do processo a arco elétrico (AS, Arc Spraying) empregando-se o sistema TAFAs Model 8830 (Tafa, Concord, NH, EUA) (figura 3.1). Os parâmetros do processo de aspersão são mostrados nas tabelas 3.5 e 3.6. Os corpos de prova foram aspergidos em empresa local conveniada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

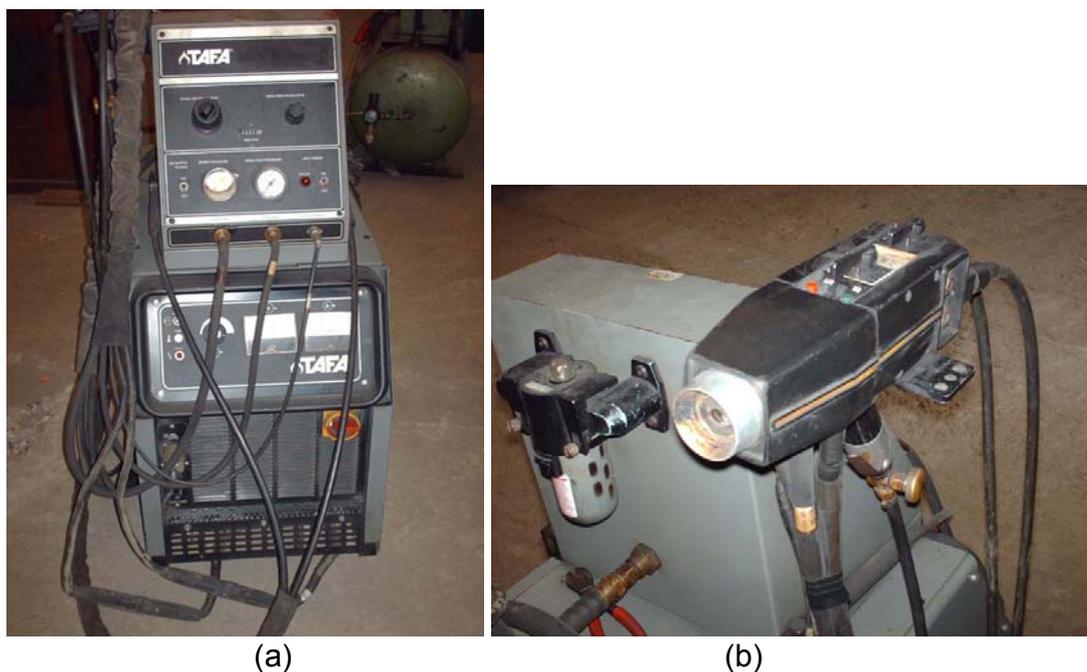


Figura 3.1 – a) Equipamento de aspersão térmica; b) Pistola de aspersão.

Tabela 3.5 - Parâmetros de Controle do Processo de Aspersão.

Amostra	Pré-Aquec.	Distância ao Substrato (mm)	Velocidade m/min	Pressão do Spray (psi) (KPa)
316L, 420 e 420 +316L	Não aplicável	200	25	50 345
Base Ni-4Al	Não aplicável	200	25	50 345

Tabela 3.6 Parâmetros de Controle do Processo de Aspersão.

Amostra	Pressão Alimentação Arame (psi) (KPa)	Tensão (V)	Corrente (A)
316L, 420 e 420 +316L	50 345	30	150
Base Ni-4Al	50 345	30	150

### **3.4 Ensaios de Caracterização dos Revestimentos**

#### **3.4.1 Caracterização Macro e Microestrutural**

##### **a) Microscopia Ótica (MO)**

As microestruturas dos revestimentos foram examinadas conforme a norma ASTM E 1920-03 [40] com o auxílio de um microscópio ótico Olympus BX51M equipado com uma câmera fotográfica Olympus PM20 e câmera digital Sony ExwaveHAD utilizando-se um aumento de 200x. Os corpos de prova produzidos apresentam dimensões de 10 x 10 x 3 mm, conforme tabela 3.4. Foram analisadas as secções transversais dos revestimentos após aspergidos e também as secções transversais dos revestimentos após os ensaios de corrosão.

##### **b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Foram examinadas as superfícies dos revestimentos como aspergidos e também a superfície dos revestimentos após a execução do ensaio de desgaste. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o modelo JSM-6460 da JEOL. Os ensaios foram realizados logo após limpeza em banho ultra sônico contendo etanol e secagem com jato de ar quente.

##### **c) Medição da Espessura**

A medição da espessura dos revestimentos foi realizada com análise visual direta da secção transversal dos revestimentos sendo estimada por microscopia ótica conforme Norma ASTM B 487-02 [41]. Foram realizadas cinco medições ao longo de toda a secção da amostra, obtendo-se um valor médio.

##### **d) Medição da Porosidade**

Os percentuais volumétricos da porosidade nos revestimentos foram quantificados percentualmente através de contagem de pontos em fotografias obtidas com o auxílio de um microscópio ótico, sob um aumento de 200x, de acordo com a Norma ASTM E 562-02 [42]. As medidas foram realizadas sobre as secções transversais dos revestimentos após aspergidos e após a realização do tratamento térmico. Este método descreve uma sistemática de contagem manual de pontos para estimar estatisticamente a fração de volume de um constituinte ou de uma fase identificável através da microestrutura por meio de uma grade de pontos. A figura 3.2 exemplifica possíveis configurações de grades que podem ser executadas na execução do ensaio. A grade adotada na medição dos percentuais volumétricos corresponde a grade do item c, constituída de 100 pontos.

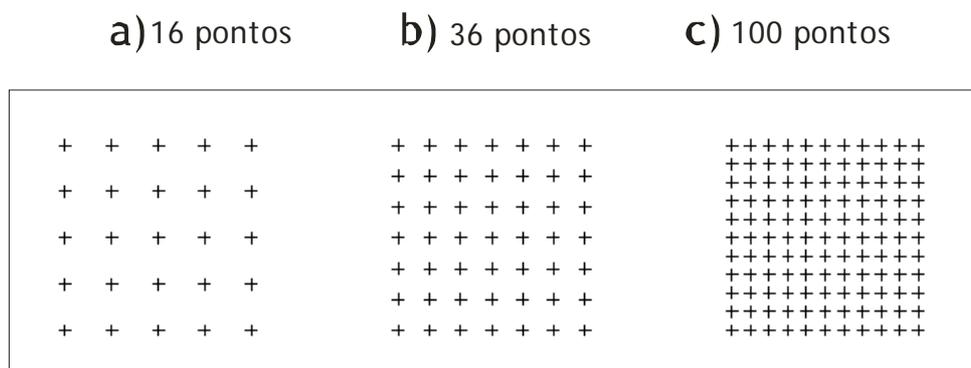


Figura 3.2. Exemplos de possíveis configurações de grades que podem ser adotadas.

### e) Análise de Composição Química

A análise da composição química dos revestimentos aspergidos termicamente foi analisada através de um espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de ródio (Rh).

A análise da composição química do substrato foi realizada através de um espectrômetro ARL Metal Analyzer Iron&Steel.

### f) Análise de Difração de Raios-X

Os revestimentos foram analisados em um difratômetro de raios-X Shimadzu XRD6000, operado pelo software XRD específico. A radiação utilizada foi Cu-K $\alpha$  com comprimento de onda de 1,54184Å e o registro do difratograma para ângulos de 2 $\theta$  entre 10° e 80°, com passos de amplitude de 2 deg/min e tempo de medição de 1,5s à 35 min por passo.

Os constituintes dos revestimentos foram identificados a partir dos resultados do ensaio de difração, com auxílio da base de dados “Joint Committee of Powder Diffraction Standards” (JCPDS), que permite a indexação dos picos e identifica os planos e fases.

#### 3.4.2 Medição da Rugosidade dos Revestimentos

Para a medição da rugosidade superficial dos revestimentos utilizou-se do método de ensaio de acordo com a Norma NBR ISO 4287 (2002) [43]. Cinco medidas de rugosidade foram realizadas para cada experimento através de um rugosímetro digital de bancada com contato mecânico Mitutoyo modelo SJ-400.

Para cada revestimento foram efetuados uma seqüência de cinco medidas com um comprimento de amostragem (cut-off) de 3,2 mm, tornando-se o devido cuidado de não sobrepor a agulha do rugosímetro na superfície na qual outro ensaio tivesse sido realizado, obtendo-se desta forma os valores médios dos parâmetros da rugosidade média ( $R_a$ ), rugosidade média quadrática ( $R_q$ ) e o parâmetro profundidade média de rugosidade ( $R_{z\text{ DIN}}$ ), determinados em  $\mu\text{m}$ .

O parâmetro  $R_a$  consiste na média aritmética dos valores dos desvios do perfil a partir de um plano médio, dentro do percurso de medição, sendo o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo e aplicável à maioria dos processos de fabricação.

O parâmetro  $R_q$  descreve o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade da reta média dentro do comprimento de medição realizado.

O parâmetro  $R_{z\text{ DIN}}$  (altura de dez-pontos) é calculado para revelar os valores de altura extrema da superfície, ou seja, corresponde à média aritmética dos cinco maiores picos e cinco vales mais profundos no comprimento de amostragem [44].

### **3.4.3 Caracterização das Propriedades Mecânicas**

#### **a) Medição da Microdureza**

A dureza é uma propriedade de conceituação difícil. Ela pode ser interpretada tecnologicamente como a resistência de um material à deformação permanente, ou a resistência à penetração e menos precisamente como a resistência ao corte ou a ser riscado ou ainda a resistência ao desgaste. Todos esses conceitos são passíveis de crítica, não existindo assim uma relação definida entre dureza e resistência ao corte e ao desgaste, devido à falta de homogeneidade dos materiais que podem ter constituintes variados [45].

O ensaio de dureza foi idealizado por Smith e Sandland em 1925. Este ensaio pode ser dividido em três tipos principais, que dependem da maneira pela qual o ensaio é conduzido: por penetração, por choque ou por riscamento. O teste mais usado é o de penetração estática, no qual uma esfera, cone de diamante ou pirâmide é forçada para dentro de um material a ser ensaiado. A relação entre a carga aplicada e a área da profundidade de penetração fornece a medida de dureza e os ensaios conhecidos deste tipo são Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers [46].

Na determinação da dureza de microconstituintes em uma liga ou na medida de camadas micrométricas de deposição, usa-se o ensaio de microdureza, que são realizados com equipamentos dotados de microscópio e de penetrador do tipo Vickers ou Knoop, escolhidos de conformidade com a geometria da fase que se deseja determinar a microdureza. Na determinação da microdureza Vickers o indentador (penetrador) é uma pirâmide de diamante, de base quadrada, com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas (figura 3.3). É utilizada uma carga inferior a 1Kgf, a qual produz uma impressão microscópica em forma de losango regular com a face quadrada [47].

A determinação da microdureza Vickers dos revestimentos foi realizada, conforme Norma ASTM E 384-99 [48], através de um microdurômetro digital Shimadzu modelo HMV-2 instalado em um microscópio ótico, sendo realizadas dez medições diretamente sobre a seção transversal das amostras metalográficas, obtendo-se então um valor médio. A carga aplicada na superfície polida da amostra foi de 2,942N durante vinte segundos produzindo uma microscópica deformação plástica na forma de um losango.

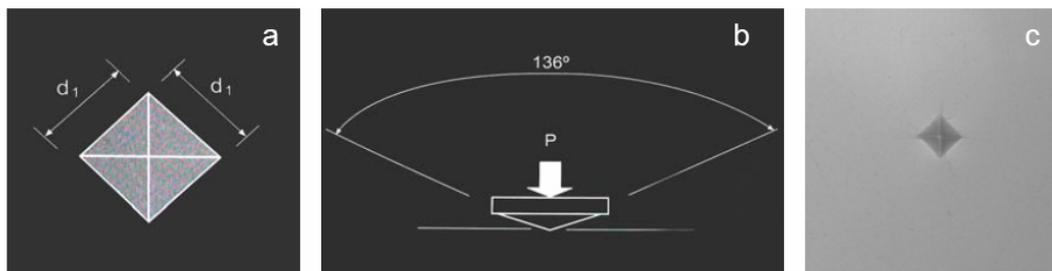


Figura 3.3 – a) Base quadrada; b) Angulação; c) Indentação Vickers.

### b) Medição da Resistência ao Desgaste

A resistência ao desgaste ou à abrasão é definida como a capacidade de um material, ao ser submetido contra uma superfície abrasiva através de contato em movimento relativo, resistir ao desgaste. Geralmente é medida sob condições definidas de carga e velocidade e comparada com uma composição conhecida. Os resultados deste ensaio servem para comparar materiais, mas não possibilita a extrapolação de seus resultados para correlação com o desempenho em serviço.

O ensaio de desgaste adotado foi o de desgaste abrasivo, conforme a Norma ASTM G 99-04 [49], utilizando-se de um abrasômetro do tipo “Pino sobre Disco”, a três corpos. Dois corpos de prova com 6 mm de diâmetro, foram posicionados em um dispositivo circular fixado no eixo de aplicação da carga. Os corpos de prova localizavam-se equidistantes do centro do dispositivo e foram forçados a deslizar sobre papéis abrasivos de granulometria #180 e #320, sob carga de 660g e 880g, aplicadas diretamente no eixo, com percurso de deslizamento de 18 metros. Para cada condição do ensaio foram ensaiados três corpos de prova.

Os parâmetros adotados na caracterização dos revestimentos de aço inoxidável e do substrato, quanto à resistência ao desgaste foram: variação no comprimento do corpo de prova ( $L$ ) em função da distância percorrida no deslizamento e o volume total de material removido depois de completado o percurso. Foi definido um índice de desgaste ou de abrasão ( $I_d$ ), como sendo o volume de material removido por comprimento do percurso.

O volume de material removido durante o ensaio foi estimado com base na redução do peso, e na densidade de cada material ensaiado, sendo esta calculada em função do peso inicial de cada corpo de prova.

Para a execução do ensaio foi desenvolvido o dispositivo abrasômetro do tipo “Pino sobre Disco”, que foi aplicado especialmente para determinar a resistência à abrasão dos revestimentos e substrato. O equipamento consiste em um disco giratório, de ferro fundido cinzento, sendo os corpos de prova mantidos sob pressão constante contra o abrasivo, durante o decorrer do ensaio, através de discos colocados sobre um pino. Estes discos com o seu peso exercem dessa forma a pressão para a realização do ensaio. O conjunto de sustentação do pino juntamente com os corpos de prova é fixado a um dispositivo (carro) que se desloca transversalmente à superfície do disco de ferro fundido. A rotação da máquina utilizada foi de 160 rpm, sendo as dimensões dos corpos de prova

mostradas na figura 3.4 abaixo. O equipamento abrasômetro é mostrado na figura 3.5.

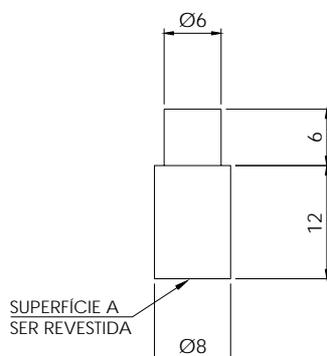


Figura 3.4 – Desenho esquemático de um corpo de prova para o ensaio de desgaste.

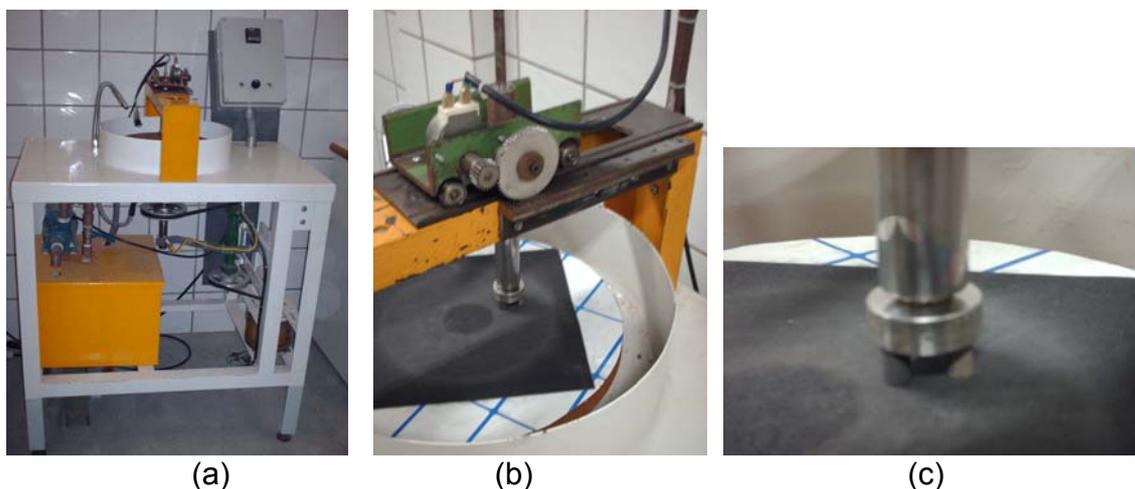


Figura 3.5 – a) Equipamento abrasômetro; b) Detalhe do dispositivo de deslocamento do corpo de prova na execução do ensaio; c) Detalhe dos corpos de prova sob execução do ensaio.

#### 3.4.4 Caracterização Eletroquímica

A caracterização eletroquímica foi realizada, conforme Norma ASTM G59-03 [50], de forma sistemática e o sistema utilizado foi constituído por:

- célula eletroquímica desenvolvida de teflon conforme visualizado na figura 3.6 e mostrado de forma esquemática na figura 3.7;
- eletrodo de referência de Ag/AgCl (KCl saturado);
- contra-eletrodo de platina;
- eletrodo de trabalho (substrato sem revestimento, substrato revestido e chapas de aço inoxidável AISI 316L e 420);

- eletrólito, que consistiu em uma solução 3,5% NaCl com um valor de pH igual a 6,6 a temperatura de 27°C, aerado naturalmente;
- um potenciostato Princeton Applied Research Potentiostat/Galvanostat 273A (figura 3.8);
- área projetada dos revestimentos, exposta ao eletrólito, de 1cm<sup>2</sup>.

Para a aplicação das técnicas e processamento dos dados foram utilizados, acoplado ao potenciostato, um computador e o software EG&G 352 SoftCorr III.

As medidas eletroquímicas foram realizadas à temperatura ambiente e sem agitação, utilizando o substrato com revestimento e chapas dos aços inoxidáveis AISI 316L. Para uma melhor compreensão do comportamento dos revestimentos, estudou-se também o substrato sem revestimento, sendo o mesmo submetido a lixamento total da superfície com posterior polimento seguindo a seqüência apresentada no item 3.2. As dimensões dos corpos de prova são 50 x 50 x 3 mm, conforme tabela 3.4.

Nos ensaios de polarização os registros dos dados foram iniciados sistematicamente após três minutos da imersão do corpo de prova na solução de NaCl 3,5% . O pH da solução foi determinado em um pHmetro microprocessado Quimis Q-400 MT.

Os ensaios foram realizados logo após a sua preparação que consistiu basicamente em limpeza com água destilada, banho ultra sônico contendo etanol e secagem com jato de ar quente.

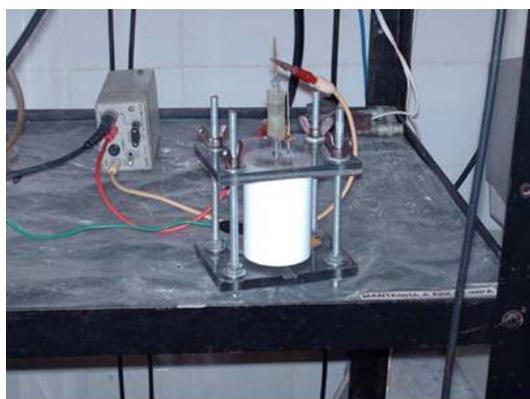


Figura 3.6 – Célula eletroquímica para o ensaio de corrosão.

### 3.4.4.1 Ensaios de Polarização

#### a) Curvas de Tafel

As curvas de Tafel foram obtidas com o eletrodo de trabalho sendo polarizado em uma faixa de varredura que compreendeu de  $-250\text{mV} \leq E_{\text{corr}} \leq +250\text{mV}$ , a uma taxa de 0,2 mV/s (10 mV/min), com relação ao eletrodo de referência de Ag/AgCl (KCl saturado). A corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ) foi medida, ao mesmo tempo, com relação a um contra-eletrodo de platina.

### b) Ensaio de Polarização Potenciodinâmica Anódica

O ensaio de polarização potenciodinâmica anódica também foi realizado a uma taxa de varredura de 0,2 mV/s com relação a um eletrodo de referência de Ag/AgCl (KCl saturado). A faixa de polarização variou de -250mV vs. Ecorr até +1000mV. A corrente de corrosão foi medida com relação a um contra-eletrodo de platina.

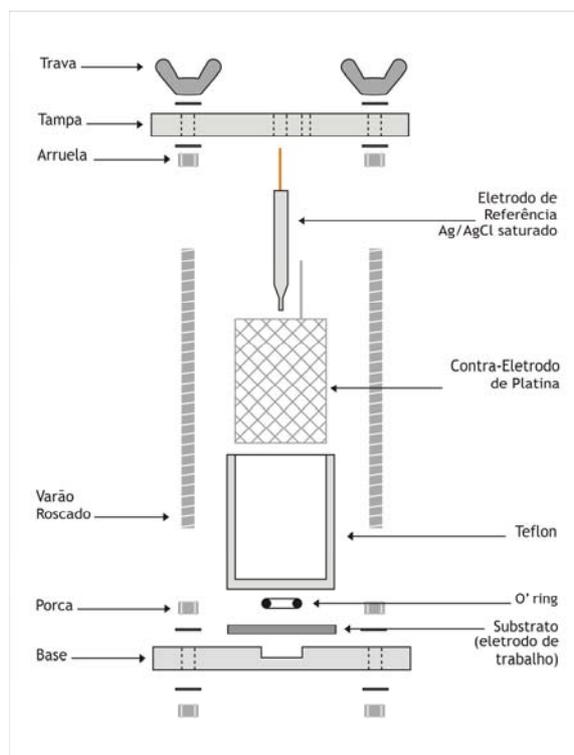


Figura 3.7 – Diagrama esquemático da célula eletroquímica desenvolvida para o ensaio de corrosão.



Figura 3.8 – Potenciostato para realização de ensaio de corrosão.

### 3.5 Tratamento Térmico

Durante o processo de aspersão térmica o material é submetido a deformações elásticas e plásticas de origem tanto mecânica quanto térmica. Estas deformações geram tensões no revestimento e no substrato, sendo que a soma de todos os efeitos capazes de causarem tensões proporciona uma tensão residual.

Os tratamentos térmicos podem ser utilizados para relaxar estas tensões, diminuindo a formação de trincas e promovendo uma melhor homogeneização do revestimento na superfície do substrato. Com o relaxamento das tensões residuais, a penetração do eletrólito que pode alcançar o substrato se torna dificultada, possibilitando desta forma aumento do efeito de proteção contra a corrosão. Com a finalidade de avaliação do maior efeito protetor do revestimento de aço inoxidável AISI 316L aliado a maior resistência ao desgaste do revestimento AISI 420 devido a sua característica martensítica e maior tendência à geração de trincas, são mostradas na tabela 3.7 as condições do tratamento térmico efetuado para o revestimento AISI 316L+420. A figura 3.9 apresenta o forno utilizado neste tratamento.

Tabela 3.7 - Condições de tratamento térmico do revestimento AISI 316L+420.

Revestimento	Tratamento	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Atmosfera
AISI 316L + 420	T1	1	450	Oxidante
	T2	4	450	Oxidante
	T3	1	750	Oxidante
	T4	4	750	Oxidante



Figura 3.9 – Forno para tratamento térmico.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

## 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos vários experimentos realizados com os revestimentos aplicados na superfície do substrato metálico, baseado em chapa de aço ABNT/SAE 1010, e revestidas com os arames utilizados (316L e 420) bem como suas combinações usadas (420+316L).

## 4.2 Caracterização Macro e Microestrutural

### a) Microscopia Ótica (MO)

As fotografias mostradas nas figuras de 4.1 a 4.4 apresentam a micrografia ótica das seções transversais dos revestimentos aplicados sobre a superfície do substrato: base de Ni-4Al, base mais a liga AISI 316L, base mais a liga, AISI 420, e base mais a mistura das duas ligas citadas.

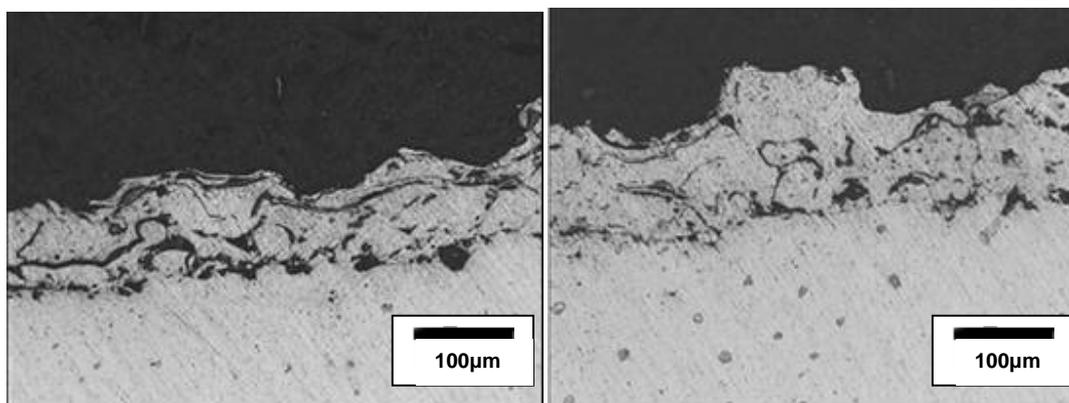


Figura 4.1 Micrografias óticas de seções transversais do revestimento Base Ni+4Al (aumento 200x).

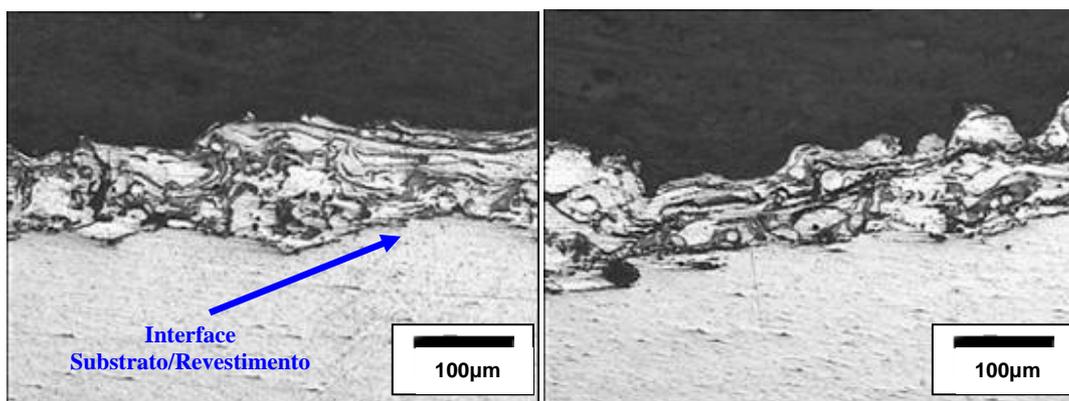


Figura 4.2 Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L (aumento 200x).

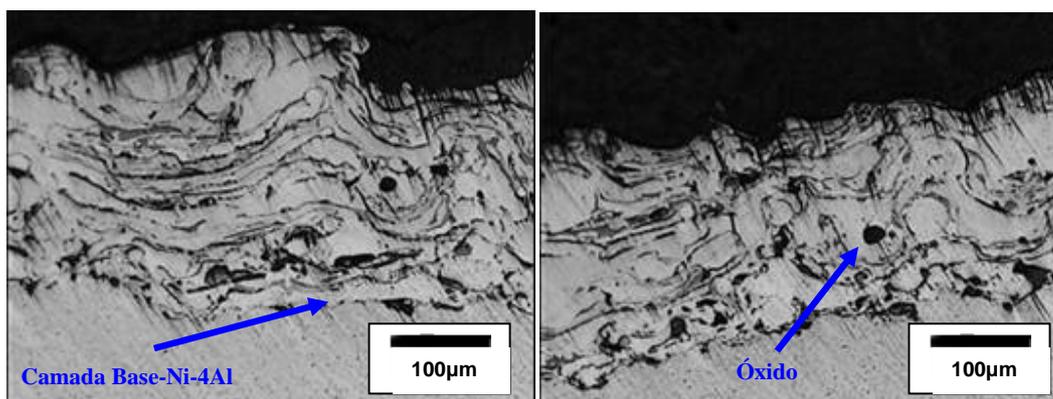


Figura 4.3 Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 420 (aumento 200x).

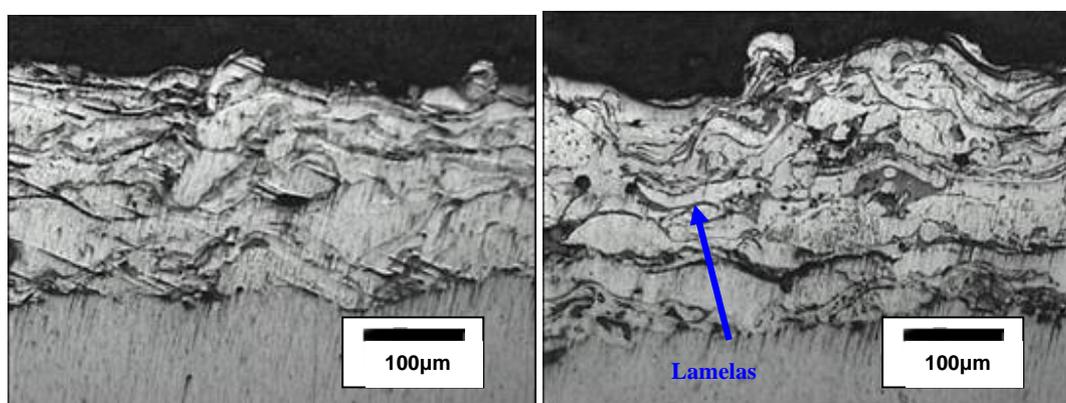


Figura 4.4 Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L + 420 (aumento 200x).

Em todos os revestimentos aplicados, são observadas estruturas típicas deste tipo de revestimento, ou seja, a deposição em camadas na forma de lamelas. Estas lamelas evidenciam a boa fusão dos arames no processo de aspersão. É possível também observar a presença do revestimento de base, sendo este menos evidente quando o substrato é revestido com a combinação das duas ligas.

Através da análise das micrografias dos revestimentos e nas observações realizadas ao microscópio óptico, pôde-se notar que existe boa aderência entre o substrato e o revestimento, evidenciado pela inexistência de partículas não fundidas e pela pouca incidência de formação de óxidos na interface revestimento substrato. Também, o nível de porosidade do revestimento mostrou-se bastante baixo, como será posteriormente mostrado.

A figura 4.5 apresenta a microestrutura do revestimento AISI 316L+420, na sua seção transversal, após a realização do tratamento. É possível observar a densificação das camadas do revestimento em todos os tratamentos térmicos realizados com maior densificação para o tratamento com temperatura mais elevada e maior tempo de tratamento. Estes resultados evidenciam a influência do

tratamento na qualidade do revestimento e proporcionaram melhoria no comportamento do revestimento quanto à resistência à corrosão a serem apresentados posteriormente nos ensaios de Tafel.

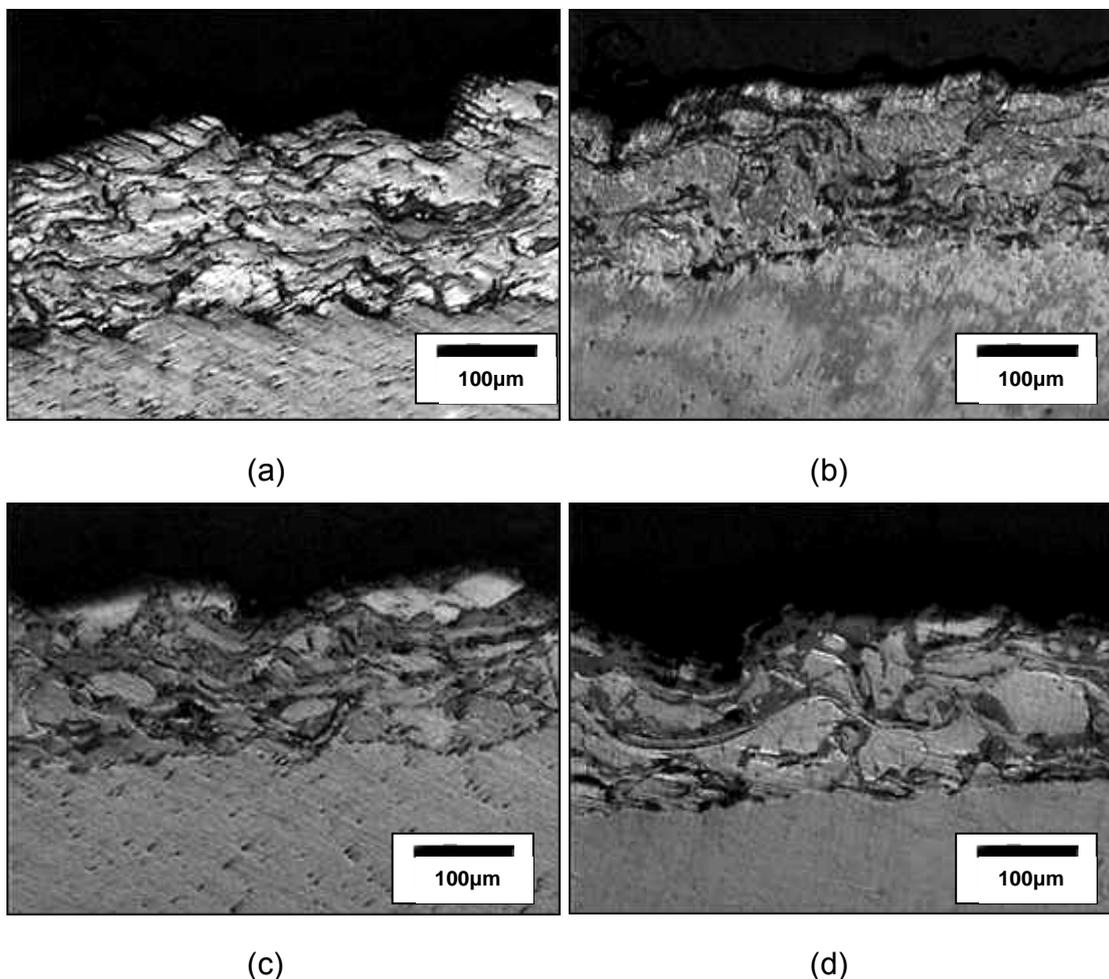


Figura 4.5 Micrografias óticas de seções transversais do revestimento AISI 316L+420 após tratamento térmico (aumento 200x): a) T1; b) T2; c) T3; d) T4.

#### **b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Os resultados da análise por Microscopia Eletrônica de Varredura da microestrutura dos revestimentos, são mostrados nas figuras de 4.6 a 4.8. A figura 4.6 apresenta a topologia da superfície dos revestimentos com aço AISI 316L e AISI 420, aplicados isoladamente, e a figura 4.7 apresenta a topologia da superfície dos revestimentos com a mistura dos dois aços. Para o nível de aumento usado na observação das estruturas, observa-se a forte irregularidade superficial dos revestimentos, com incidência de regiões com grandes depressões e saliências.

As irregularidades verificadas não estão presentes na interface revestimento substrato, como observado nas figuras de 4.1 a 4.4, referentes aos revestimentos

sem tratamento. Contudo, é importante considerar tais irregularidades quando da análise dos resultados dos ensaios de resistência à corrosão, quando, porosidade e demais irregularidades podem influenciar no comportamento dos revestimentos quanto a tais propriedades.

A microestrutura da fotografia da figura 4.8 evidencia a ocorrência de trincas na superfície do revestimento depositado do aço AISI 420 que pode ser atribuída às elevadas taxas de resfriamento presentes no processo de deposição metálica por aspersão térmica, aliado a maior dureza do material usado no revestimento.

Irregularidades desta natureza também podem influenciar nos resultados dos ensaios de corrosão, por se constituir em um caminho de passagem do eletrólito, agredindo a base do revestimento e, por conseguinte, o substrato. Entretanto, a observação da microestrutura da interface nos revestimentos na figura 4.3, não evidenciou a ocorrência deste tipo de irregularidade na interface do revestimento.

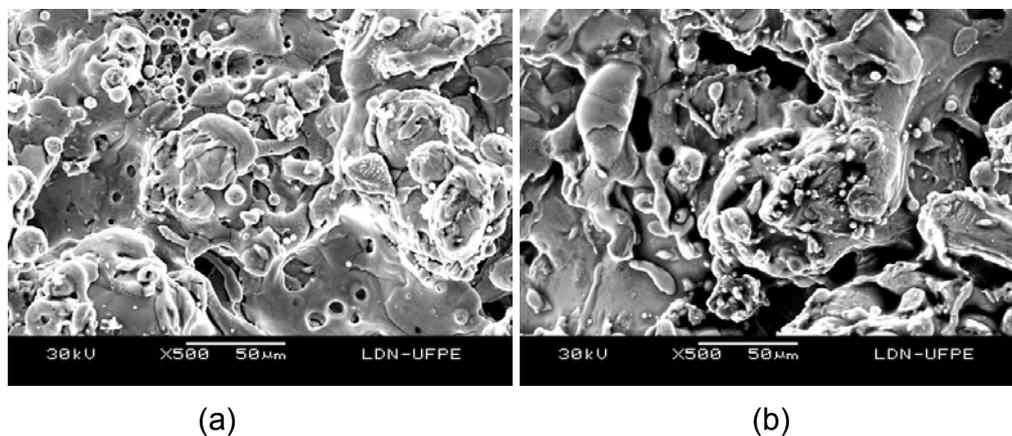


Figura 4.6 Microscopia eletrônica de varredura (aumento 500x): a) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L; b) Micrografia da amostra com revestimento AISI 420.

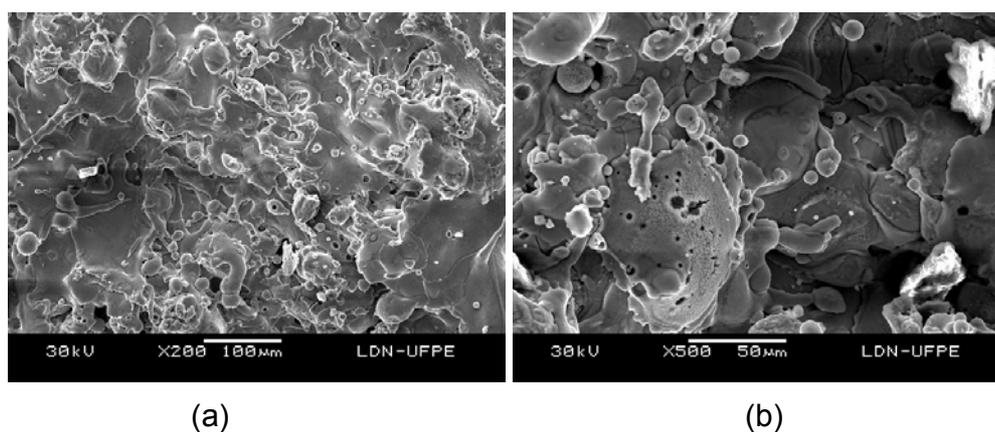


Figura 4.7 Microscopia eletrônica de varredura: a) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L+420 (aumento 200x); b) Micrografia da amostra com revestimento AISI 316L+420 (aumento 500x).

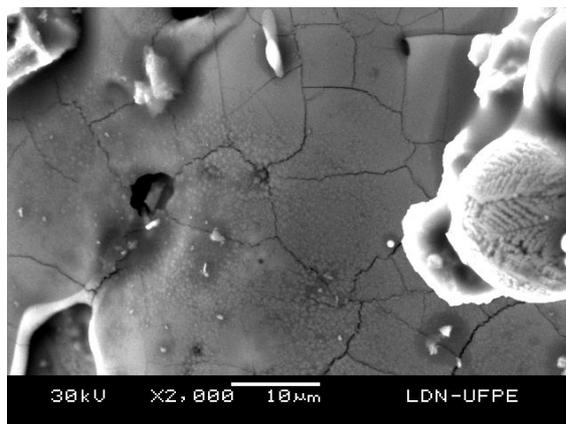


Figura 4.8 Microscopia eletrônica de varredura - Micrografia da amostra com revestimento AISI 420 (aumento 2000x).

### c) Medida da Porosidade

A melhor qualidade dos revestimentos metálicos depositados sobre superfícies metálicas, é verificada através da quantidade de poros existentes no revestimento.

A porosidade do revestimento pode ser reduzida quando a aspensão térmica é realizada em atmosferas controladas ou através de processos com maior velocidade de projeção das partículas.

O processo de aspensão térmica baseado no equipamento a arco elétrico, embora não possibilite elevadas velocidades de projeção de partículas, como o processo HVOF (High Velocity Oxy Fuel), tem-se mostrado bastante eficiente na aplicação de revestimentos metálicos devido à simplicidade de aplicação, baixo nível de porosidade e custo.

O processo de aspensão térmica a arco elétrico empregado na aplicação dos revestimentos estudados, com os parâmetros adotados no desenvolvimento dos experimentos, mostrou ser capaz de produzir revestimentos metálicos com porosidade relativamente baixa uma vez que as características deste processo, conforme apresentado na tabela 2.3.1., apresenta valores de porosidade entre 8 a 15%. Os valores médios estimados, medidos de conformidade com norma técnica específica, são mostrados na tabela 4.1.

Com a finalidade de verificar a influência de tratamento térmico sobre a porosidade do revestimento, foram feitos tratamentos térmicos a temperaturas de 450°C e 750°C, pelo período de 1 e de 4 horas. Os resultados obtidos também são mostrados na tabela 4.1. Pode-se observar a partir destes resultados que os tratamentos térmicos realizados sobre o revestimento 316L+420 proporcionaram a diminuição da quantidade de poros existentes, também confirmada através da densificação das estruturas observada nas micrografias das microestruturas dos revestimentos mostradas na figura 4.5.

Tabela 4.1. Porosidade do Metal Depositado (%)

Revestimento	Sem Tratamento Térmico
Base Ni-4Al	3,3%
316 L	7,6%
420	6,7%

Revestimento	S/ Tratamento Térmico	Tratamento 450°C		Tratamento 750°C	
		1h	4h	1h	4h
316 L + 420	7,2 %	6,9 %	6,3 %	5,9 %	5,2 %

#### d) Medida da Espessura do Revestimento

A Tabela 4.2 apresenta a espessura média do metal depositado. A camada do revestimento 316L apresenta uma menor espessura comparada aos outros revestimentos, o que não afetou os resultados dos ensaios de corrosão a serem mostrados posteriormente.

Tabela 4.2. Espessura do Metal Depositado

Revestimento	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
Base Ni-4Al	188,37
316 L	88,78
420	298,28
316 L + 420	257,06

#### e) Análise de Composição Química

A Tabela 4.3 apresenta a composição química do metal depositado. Pode-se observar que a composição química apresentada pelos aços usados nos revestimentos metálicos AISI 316L e AISI 420, estão de conformidade com as composições apresentadas na norma técnica que os caracterizam.

Tabela 4.3. Composição Química do Metal Depositado (%).

## Revestimento AISI 316 L

Fe	Cr	Mn	Mo	Si	V	Co	P	Nb	Ni	Cu	Al	Mg
70,1	18,1	5,7	0,31	0,54	0,10	0,08	0,03	0,02	4,67	0,12	0,06	0,02

## Revestimento AISI 420

Fe	Cr	Mn	Mo	Si	V	P	S	Ni	Cu	Al	Ca	Mg
86,3	12,1	0,27	0,09	0,44	0,06	0,04	0,05	0,18	0,03	0,19	0,03	0,04

## Revestimento AISI 316L+420

Fe	Cr	Mn	Mo	Si	V	P	S	Ni	Cu	Al	Nb	K
85,2	13,6	0,30	0,04	0,33	0,05	0,02	0,05	0,30	0,03	0,05	0,01	0,01

**f) Análise por Difração de Raios-X**

As figuras 4.9 a 4.12 apresentam os difractogramas de raios-X dos revestimentos aspergidos Base Ni-4Al, AISI 316L, AISI 420 e AISI 316L+ 420, respectivamente, onde é possível observar que os picos apresentados nesta análise, correspondem aos constituintes do material original dos arames, usados na deposição metálica.

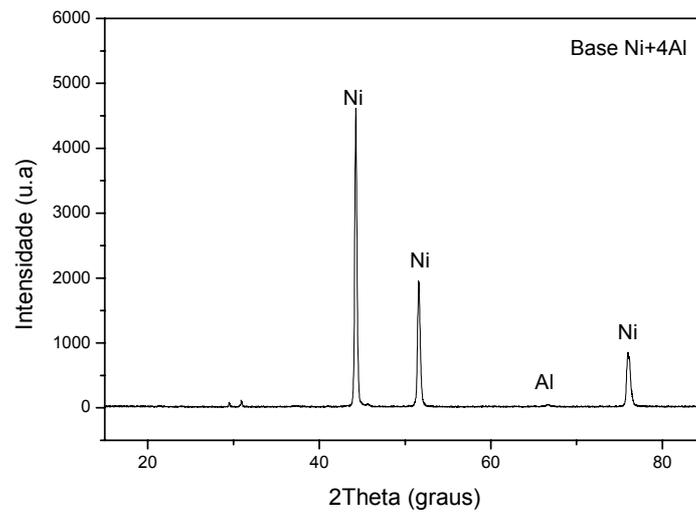


Figura 4.9. Difratograma de raios-X da amostra com revestimento Base Ni+4Al.

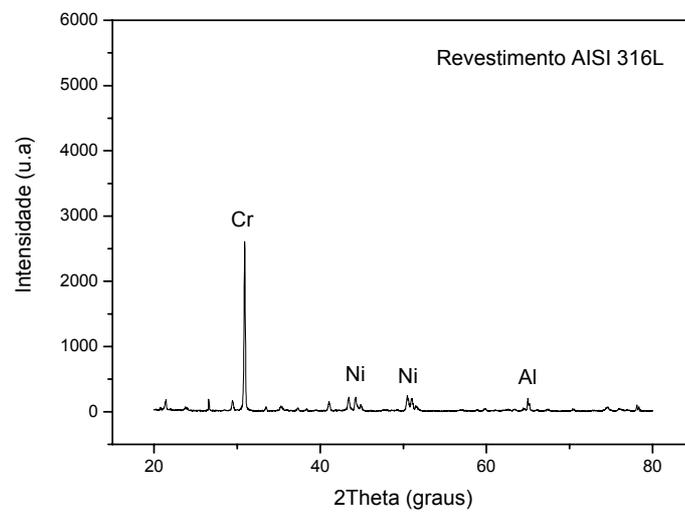


Figura 4.10. Difratograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 316L.

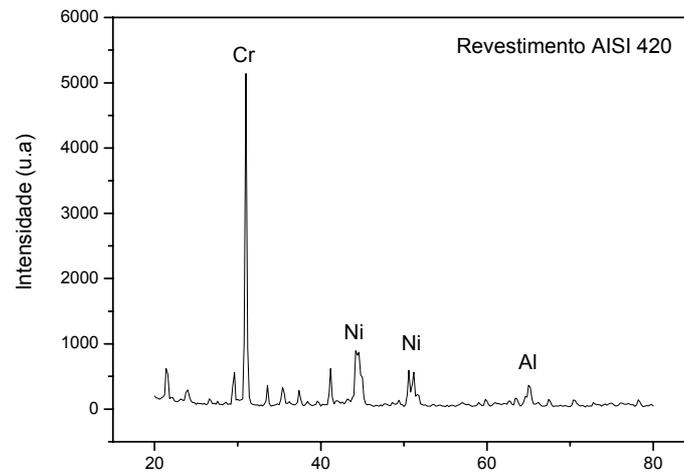


Figura 4.11. Difractograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 420.

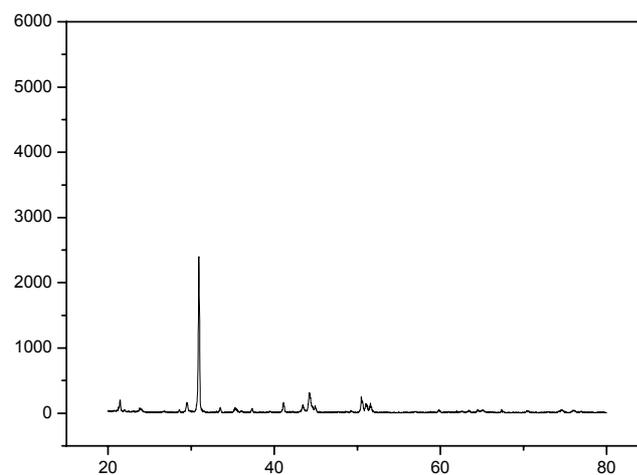


Figura 4.12. Difractograma de raios-X da amostra com revestimento AISI 316L+420.

### **4.3 Medição da Rugosidade Superficial do Revestimento**

As médias obtidas na superfície dos revestimentos são mostradas na tabela 4.4, para a amostra como revestido e na tabela 4.5, para as amostras após realização de tratamento térmico para a mistura dos revestimentos AISI 316L+420. As figuras 4.13 e 4.14 mostram, respectivamente, a comparação entre os valores de rugosidade para todos os revestimentos depositados e os valores

correspondentes ao tratamento térmico do revestimento AISI 316L+420, sendo que para este observa-se a diminuição da rugosidade comparando-se os revestimentos para tratamentos em uma mesma temperatura, para o aumento do tempo de duração do ensaio.

Tabela 4.4. Rugosidade do Metal Depositado sem Tratamento Térmico

Revestimento	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	RzDin ( $\mu\text{m}$ )
Base Ni-4Al	18,446	22,632	93,815
AISI 316 L	21,411	26,168	99,380
AISI 420	20,585	25,048	100,052
AISI 316 L + 420	15,225	18,359	63,313

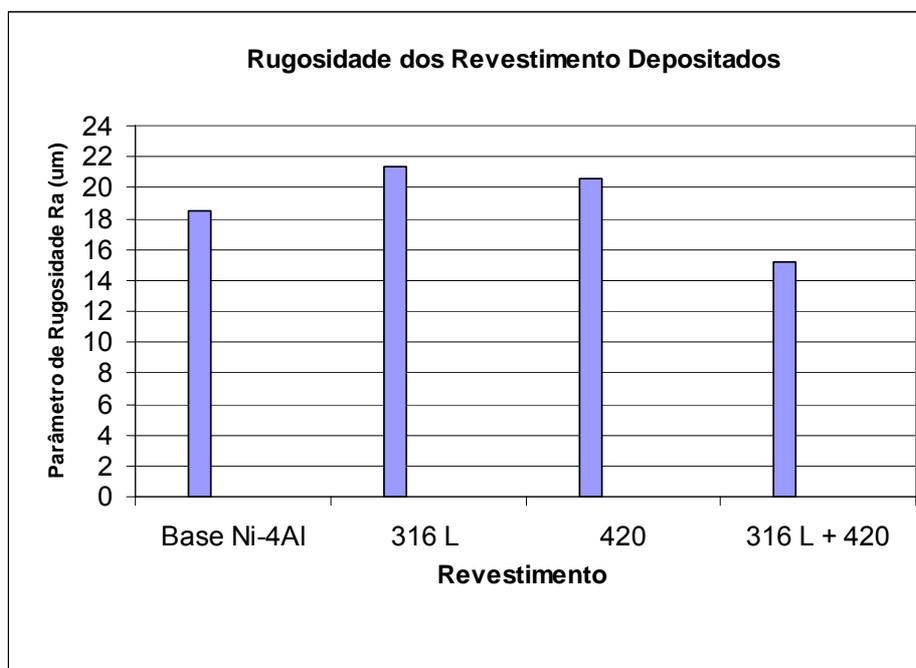


Figura 4.13. Rugosidade dos revestimentos depositados.

Tabela 4.5. Rugosidade do Revestimento AISI 316L+420 após realização de Tratamento Térmico.

Tratamento Térmico	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	RzDin ( $\mu\text{m}$ )
T1 (450°C, 1h)	16,744	20,651	86,130
T2 (450°C, 4h)	14,484	17,787	75,432
T3 (750°C, 1h)	19,491	24,655	103,895
T4 (750°C, 4h)	15,935	19,412	77,827

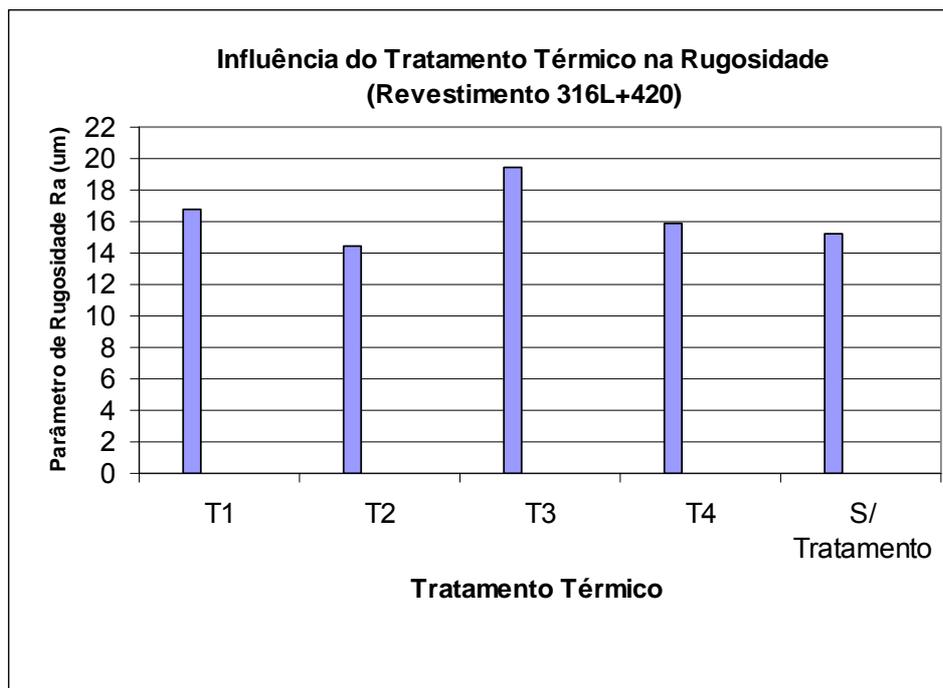


Figura 4.14. Influência do tratamento térmico na rugosidade para o revestimento AISI 316L+420.

#### 4.4 Caracterização das Propriedades Mecânicas

##### a) Medição da Dureza (Microdureza)

Os resultados do ensaio de microdureza estão mostrados na tabela 4.6 e figura 4.15.

O revestimento com aço AISI 420 apresentou dureza mais elevada por se tratar de um aço inoxidável que por sua constituição apresenta estrutura martensítica. O revestimento com o aço AISI 316L que por sua constituição de estrutura austenítica, apresentou menor dureza comparado ao revestimento AISI 420, e ao revestimento com mistura dos dois aços, AISI 316L+420, apresentou dureza intermediária entre a apresentada pelos dois aços que a compõe. Todos apresentaram dureza superior a dureza da base constituída de Ni+4Al.

Tabela 4.6. Microdureza (HV) do Metal Depositado.

Revestimento	Sem Tratamento Térmico
Base Ni-4Al	99
AISI 316 L	223
AISI 420	401

Revestimento	S/ Tratamento Térmico	Tratamento 450°C		Tratamento 750°C	
		1h	4h	1h	4h
AISI 316 L + 420	312	283	268	238	175

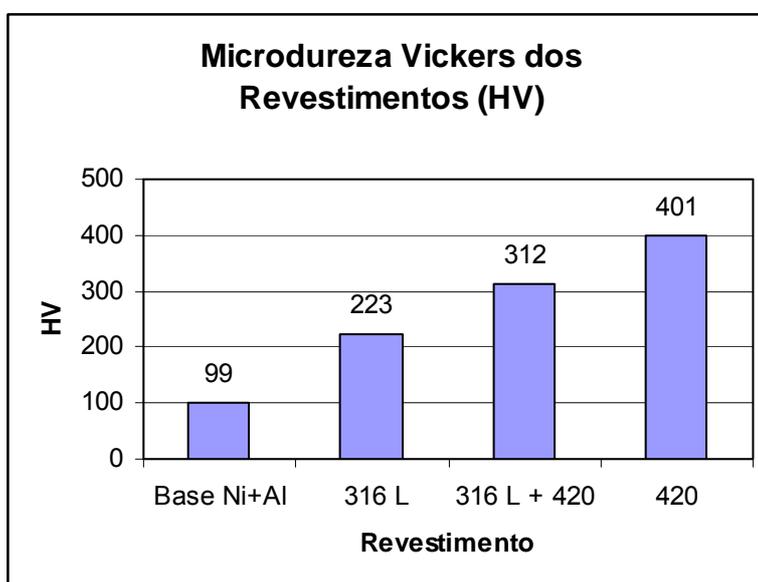


Figura 4.15. Microdureza Vickers dos revestimentos depositados.

O resultado do ensaio de microdureza dos revestimentos após os tratamentos térmicos realizados T1, T2, T3 e T4, estão apresentados na tabela 4.6 e no gráfico da figura 4.16. Para todas as condições de tratamento adotadas houve diminuição do nível de dureza do revestimento, sendo esta mais expressiva para a condição mais severa do tratamento.

Este comportamento pode ser atribuído à homogeneização do revestimento, com dissolução de fases e coalescimento de defeitos e redução de tensões resultantes da aplicação do processo, em todas as condições de tratamento. Esse efeito pode ser visualizado na figura 4.5, que apresenta a microestrutura do revestimento AISI 316L+420 após realização do tratamento térmico.

Em particular, o revestimento AISI 316L+420 após os tratamentos T1, T2 e T3, apresentou nível de dureza mais elevado em relação ao revestimento AISI 316L sem tratamento térmico. Esse efeito não foi evidenciado para o tratamento T4.

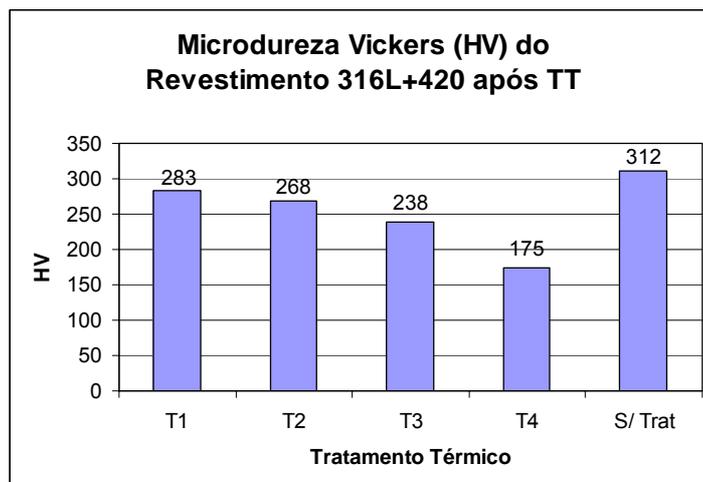


Figura 4.16. Microdureza Vickers do revestimento AISI 316L+420 após tratamento térmico.

### b) Medição da Resistência ao Desgaste

A tabela 4.7 apresenta a perda de massa ( $I_d$ ) do revestimento em função da distância percorrida de 18m e do abrasivo utilizado (g/m).

O resultado do ensaio de desgaste observou que o comportamento dos revestimentos em estudo não apresentou variações significativas em relação às condições de ensaio. Entretanto, a resistência ao desgaste dos revestimentos aplicados apresentou variações destes resultados quando comparados entre si.

O revestimento AISI 420, por se tratar de um revestimento martensítico apresentou uma maior resistência ao desgaste, comportamento contrário observado no revestimento Base Ni+4Al. Os demais revestimentos aplicados apresentaram comportamento intermediário, onde o revestimento AISI 316L mostrou maior desgaste em relação ao revestimento AISI 316L+420.

A avaliação de resultados experimentais com relação à resistência ao desgaste realizado através do dispositivo pino sobre disco apresentado na figura 4.17 mostra que o desgaste é função da carga aplicada e da granulometria do abrasivo, evidenciando que a taxa de perda de massa ou índice de desgaste é linearmente dependente das condições em que foi submetido o ensaio [51].

Tabela 4.7. Perda de Massa ( $I_d$ ) em função da distância percorrida e do abrasivo utilizado (g/m)

Revestimento	#180 880g	#320 880g	#180 560g	#320 560g
Base Ni-4Al	0,083	0,072	0,074	0,054
316 L	0,068	0,052	0,064	0,044
420	0,053	0,046	0,050	0,038
316 L + 420	0,066	0,048	0,058	0,038
Substrato	0,069	0,048	0,050	0,033

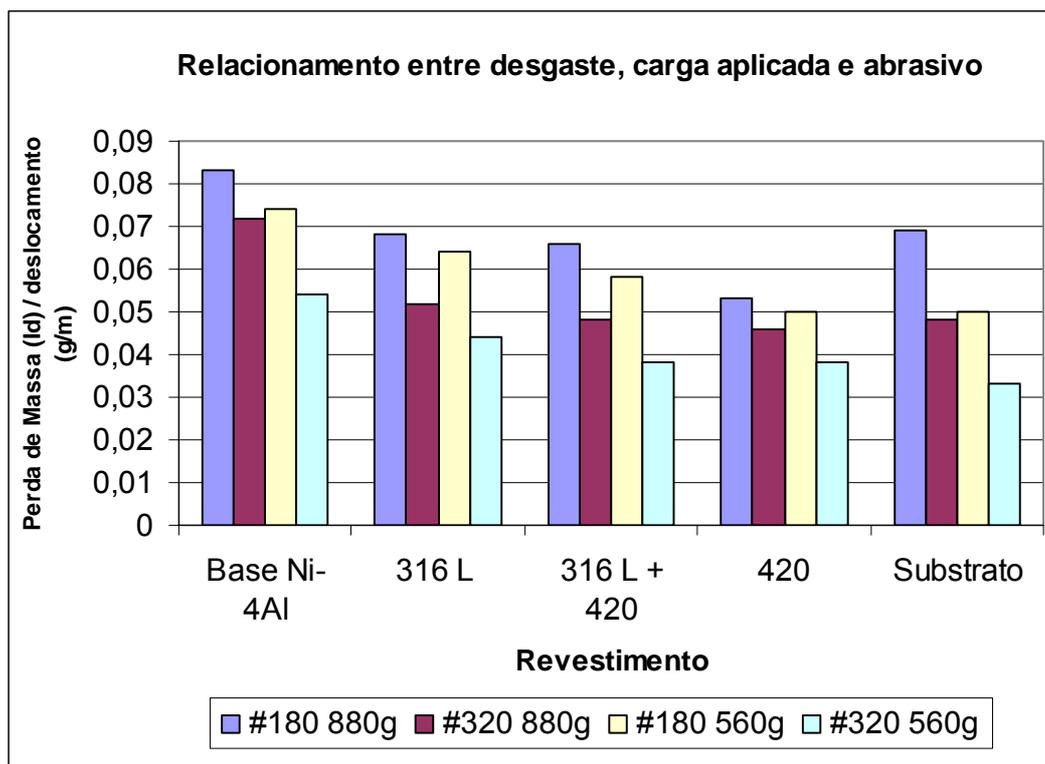


Figura 4.17. Relacionamento entre desgaste, carga aplicada e granulometria do abrasivo utilizado.

As imagens das figuras de 4.18 a 4.21 mostram os resultados da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada na superfície dos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de desgaste por abrasão. A amostra do substrato sem revestimento é apresentada na figura 4.18 e as amostras do substrato revestido são apresentadas nas figuras 4.19; 4.20 e 4.21.

Nas imagens com o aumento de 500X, as amostras do substrato e do aço inoxidável AISI 316L apresentam sulcos de desgaste semelhantes, compatíveis com o resultado do ensaio de desgaste apresentado pelas duas superfícies em questão.

Os resultados apresentados na análise da superfície de desgaste dos corpos de prova revestidos com os aços AISI 420, com a mistura AISI 316L+AISI 420, também apresentam a mesma característica de desgaste.

O mecanismo de desgaste presentes nos corpos de prova do substrato e da amostra com revestimento AISI 316L evidencia a deformação plástica, seguida de cisalhamento e desprendimento do material da superfície devido ao efeito do desgaste imposto pelo ensaio.

Com relação ao equipamento desenvolvido para análise de resistência ao desgaste, sua concepção e construção levou à obtenção de resultados satisfatórios após a realização dos testes de funcionamento e execução dos ensaios.

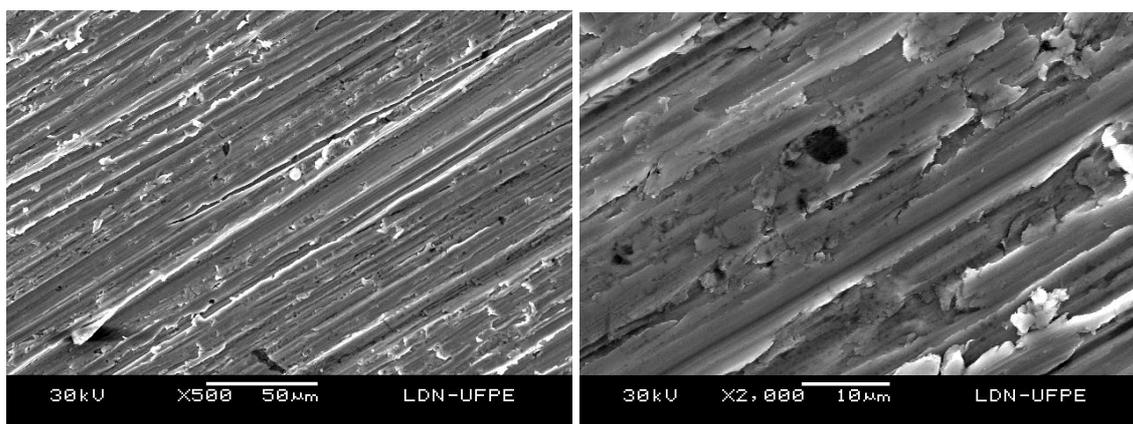


Figura 4.18. Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do substrato (aumento 500x); b) Amostra da superfície do substrato (aumento 2000x).

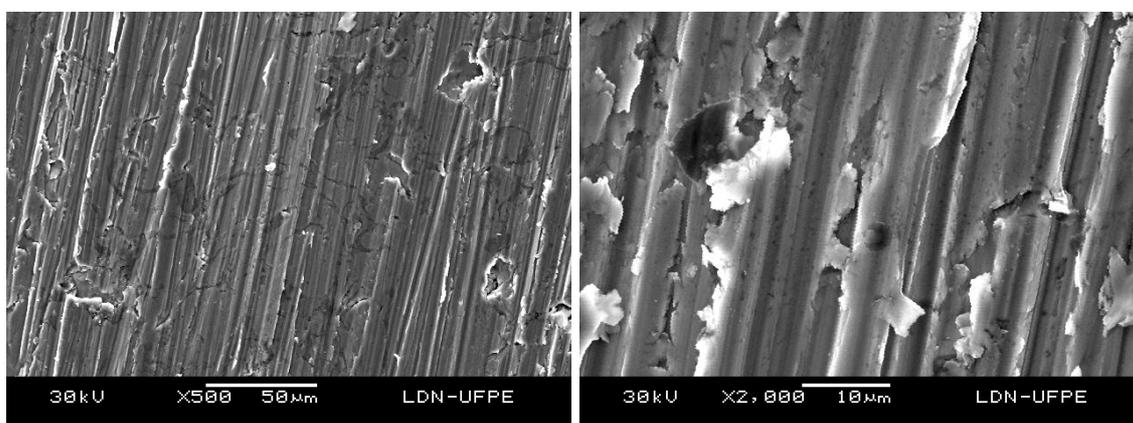


Figura 4.19. Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L (aumento 500x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L (aumento 2000x).

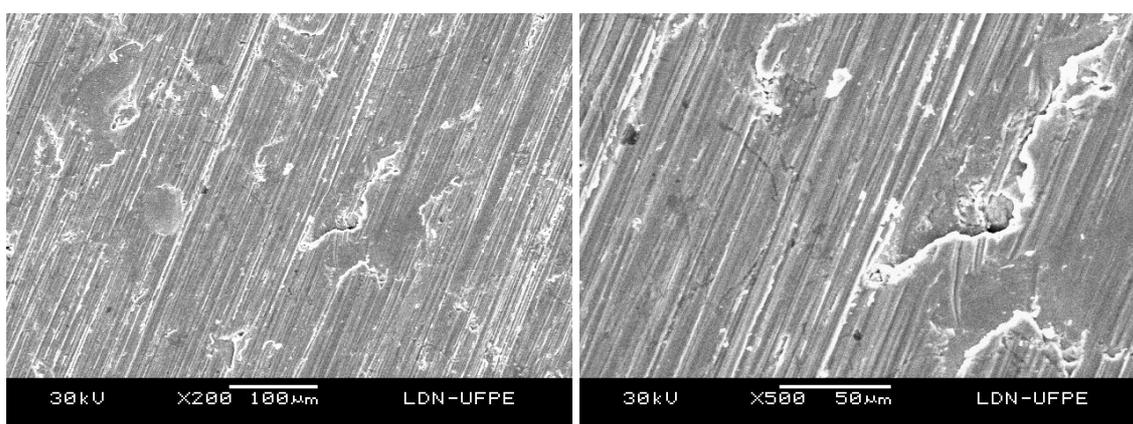


Figura 4.20. Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 420 (aumento 200x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 420 (aumento 500x).

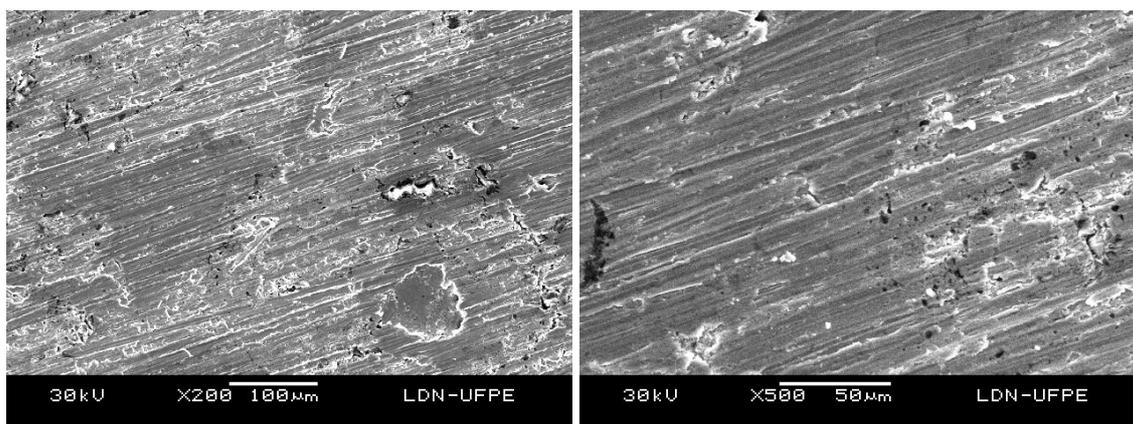


Figura 4.21. Microscopia eletrônica de varredura: a) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L+420 (aumento 200x); b) Amostra da superfície do revestimento AISI 316L+420 (aumento 500x).

#### 4.5 Caracterização Eletroquímica

A partir das curvas de polarização procura-se estabelecer uma relação entre o tipo de ataque corrosivo que sofre o material e sua resistência à corrosão.

Com a finalidade de permitir uma análise final conjunta dos resultados, todos os parâmetros medidos de potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ), e as inclinações de Tafel para os revestimentos aplicados são reunidos na tabela 4.8.

Tabela 4.8. Resultados da caracterização eletroquímica (ensaios de  $E_{\text{corr}}$ ,  $I_{\text{corr}}$  e curvas de Tafel).

Revestimento	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)
<b>Base Ni-4Al</b>	- 499,8	59,7	274,3	304,0
<b>316 L</b>	- 470,3	5,1	162,8	63,6
<b>420</b>	- 490,8	40,64	170,3	118,5
<b>316 L + 420</b>	- 487,6	45,7	247,5	546,4
<b>Substrato</b>	- 610,1	51,28	211,4	145,8
<b>Inox 316L (maciço)</b>	49,39	63,8 nA	439,9	91,37

As curvas de polarização para os revestimentos aplicados em solução NaCl 3,5% são mostradas na figura 4.22. O ramo catódico da curva representa a região onde pode ocorrer a redução de íons  $\text{H}^+$  e/ou de oxigênio.

No trecho anódico da curva de polarização é mostrada a faixa de potencial na qual pode ocorrer a dissolução anódica (corrosão) do metal ou reações de interface metal/solução, podendo haver redução ou oxidação de compostos da solução utilizada. Nessa região anódica ativa é possível observar que a densidade de corrente cresce com o aumento do potencial, caracterizando a dissolução anódica (corrosão) do material. Em especial para o revestimento AISI 316L+420 essa região estende-se desde -450mV até aproximadamente +500mV.

Comparando o ensaio de polarização para o aço inoxidável AISI 316L maciço, mostrado na figura 4.23, os revestimentos aplicados apresentaram um comportamento inferior devido as suas características microestruturais.

É possível observar no ensaio para o aço AISI 316L maciço que para potenciais superiores (~500mV) há um acréscimo progressivo da densidade de corrente, devido à dissolução dos componentes da liga.

O mesmo comportamento não foi observado para os revestimentos depositados, pois na região de potenciais entre aproximadamente -450mV até +550mV, é verificado um lento aumento na densidade de corrente em um amplo intervalo de potencial (~1000mV). Essa diferença de comportamento pode estar associada a maior heterogeneidade na estrutura, que dificulta a formação de um filme protetor.

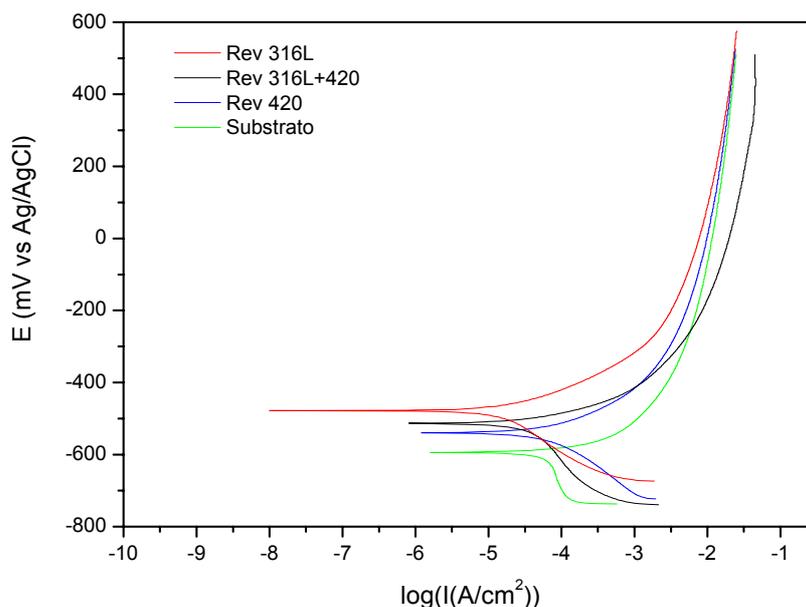


Figura 4.22. Curva de Polarização Potenciodinâmica Anódica – Revestimentos depositados.

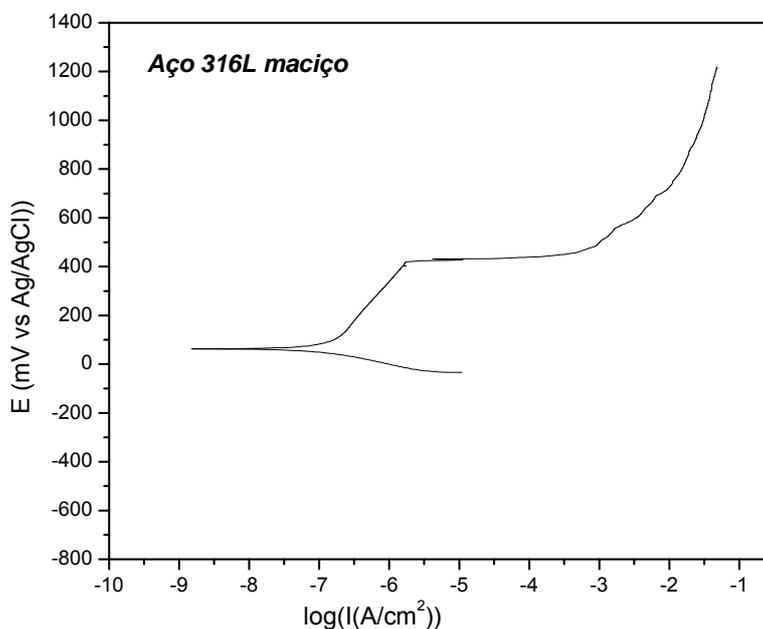


Figura 4.23. Curva de Polarização Potenciodinâmica Anódica – Aço inoxidável AISI 316L (maciço).

A partir do gráfico da figura 4.22, o revestimento AISI 316L apresenta uma resistência à corrosão superior mesmo apresentando uma espessura de camada depositada inferior, comportamento contrário ao revestimento AISI 420 facilmente observado pela corrente de dissolução maior consumida durante o processo de dissolução. O revestimento de aço inoxidável AISI 316L+420 apresentou um comportamento intermediário devido à mistura dos dois materiais mesmo com uma camada de revestimento menor comparada ao revestimento AISI 420.

Estes resultados demonstram claramente a corrosão ocorrida em todos revestimentos aplicados de forma diferenciada em função do tipo de revestimento aplicado.

Conforme apresentado na subseção 2.2.9 a, a forma que uma curva de Tafel assume decorre de como o processo de polarização é controlado, se por ativação ou por difusão. Considerando os ramos catódicos das curvas na figura 4.24 supõe-se que para todos os revestimentos aplicados a energia de ativação da reação de corrosão é quem controla a taxa de corrosão, enquanto que para o substrato o processo é aparentemente controlado por difusão.

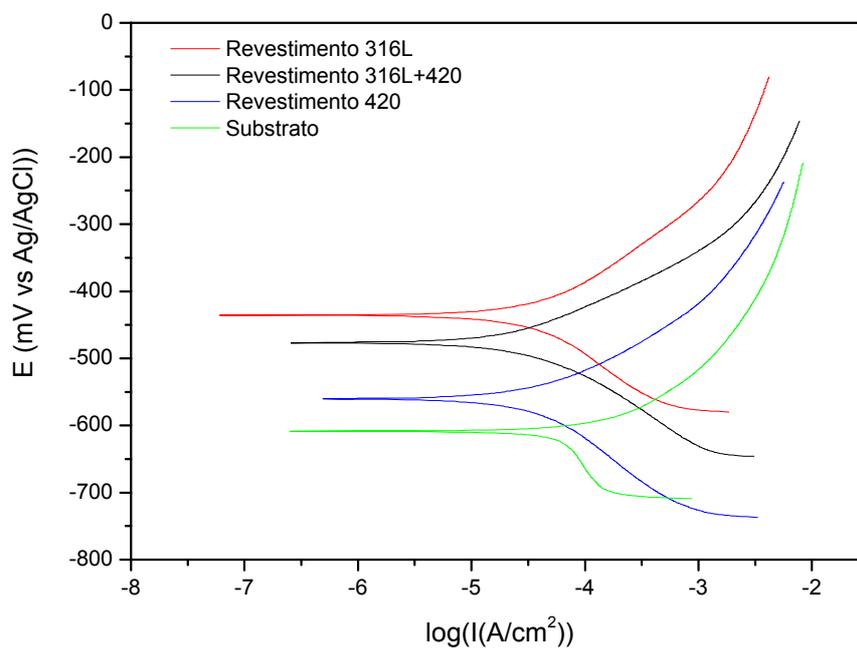


Figura 4.24. Curvas de Tafel – Revestimentos utilizados e substrato.

A figura 4.25 apresenta uma comparação, para as curvas de Tafel, entre os revestimentos aplicados, o substrato e o aço AISI 316L maciço, apresentando este último maior resistência à corrosão.

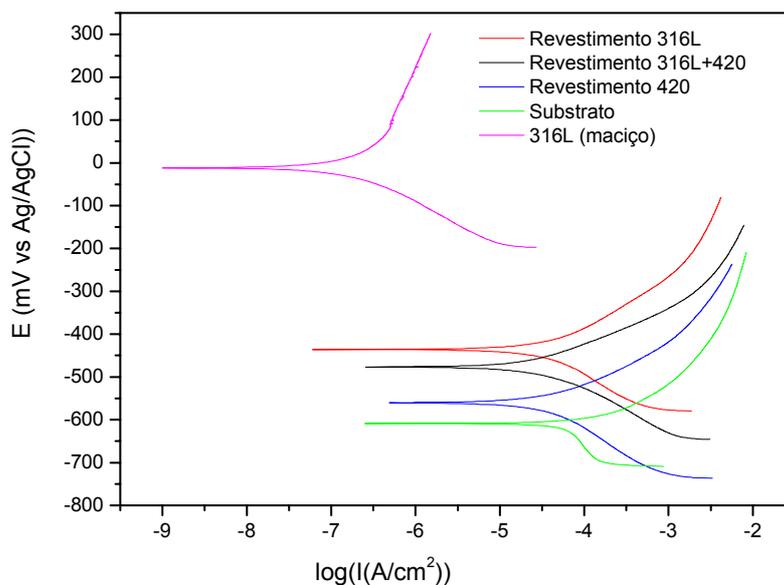


Figura 4.25. Curvas de Tafel – Comparação entre revestimentos utilizados, substrato e aço AISI 316L maciço.

Conforme apresentado nas curvas de Tafel da figura 4.26, após a realização do tratamento térmico no revestimento AISI 316L+420, o comportamento do revestimento ao tratamento T4 apresentou resultado superior devido ao maior tempo de permanência do forno. Esses fatores contribuíram para a diminuição da quantidade de poros e densificação da estrutura proporcionando uma maior proteção contra a corrosão, ou seja, um aumento do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).

Em geral, um aumento do potencial de corrosão ocorre quando sobre a superfície do metal se forma um filme passivo denso que protege o mesmo do prosseguimento do processo corrosivo. Por outro lado, quando sobre a superfície do metal se forma uma camada de hidróxido porosa que somente consegue diminuir as taxas de reação, mas não protege o material de corrosão adicional, um decréscimo no valor de  $E_{corr}$  passa a ser observado.

A figura 4.26 apresenta ainda a curva de Tafel do substrato (aço ABNT/SAE 1010 sem revestimento) evidenciando o aumento do poder protetivo do revestimento à medida que se têm o aumento do tempo de permanência no forno e aumento da temperatura (tratamentos T1, T2, T3 e também T4).

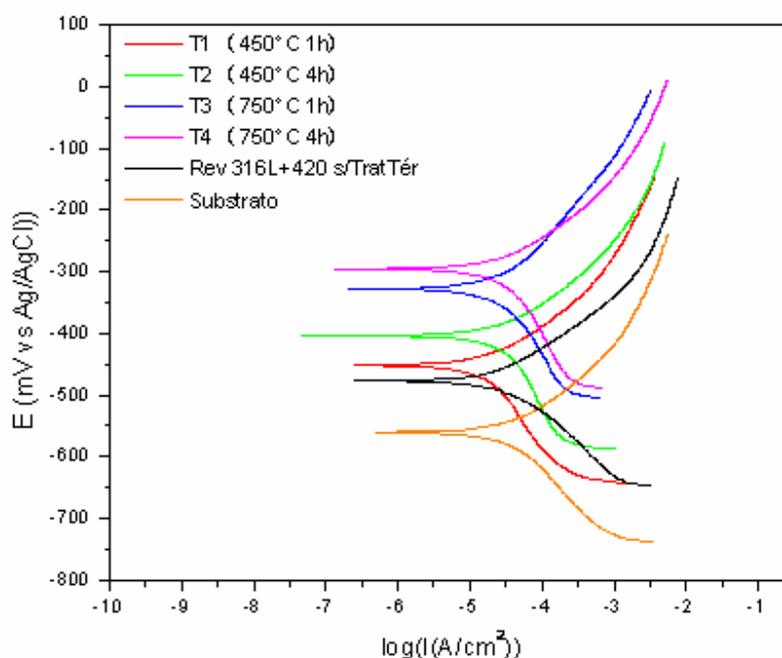


Figura 4.26. Curvas de Tafel – Revestimento AISI 316L+420 com e sem tratamento térmico e substrato.

A figura 4.27 apresenta o desgaste corrosivo após a realização dos ensaios de polarização potenciodinâmica anódica e curvas de Tafel.

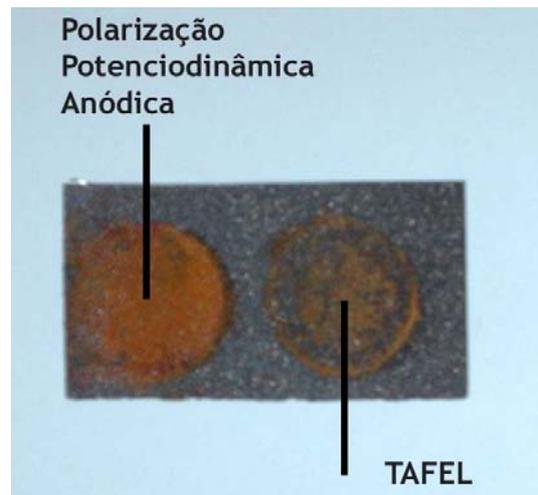


Figura 4.27. Corpo de prova após ensaios de corrosão.

## **5. CONCLUSÕES**

## **5. Conclusões**

No decorrer deste trabalho as múltiplas comparações apresentadas revelaram diferenças significativas com respeito à resistência ao desgaste e capacidade de proteção à corrosão do substrato, oferecida pelos distintos materiais de revestimento. Da mesma forma, possíveis correlações existentes entre características microestruturais, propriedades mecânicas e respostas eletroquímicas dos revestimentos foram satisfatoriamente determinadas e apresentadas.

A aplicação do revestimento AISI 316L+ AISI 420, mostrou-se efetiva, com aspecto visual, aspectos morfológicos e de porosidade dentro dos padrões característicos do processo a arco elétrico e aceitáveis para aplicação industrial.

Os valores de porosidade e rugosidade evidenciaram que o processo de aspersão térmica a arco elétrico, com os parâmetros definidos, apresentou resultado satisfatório para a utilização dos arames AISI 316L e AISI 420.

A microestrutura lamelar do revestimento evidenciou a boa fusão dos arames utilizados.

As duas técnicas de polarização empregadas apresentaram boa sensibilidade na detecção das diferenças na composição dos revestimentos analisados.

Os revestimentos depositados pelos processos de aspersão térmica a arco elétrico mostraram-se eficientes na proteção do substrato, uma vez que não houve degradação por corrosão.

Os tratamentos térmicos a que foram submetidos o revestimento AISI 316L+ AISI 420 foi efetivo na densificação das camadas depositadas e resultou na modificação da morfologia da camada e de sua microdureza, com redução do nível de porosidade e aumento da resistência à corrosão.

O equipamento abrasômetro desenvolvido para análise de resistência ao desgaste, levou à obtenção de resultados satisfatórios após a realização dos testes de funcionamento e execução dos ensaios.

Do somatório de resultados, concluiu-se que o revestimento AISI 316L+ AISI 420 é recomendado em muitas aplicações práticas, representando uma alternativa viável para sistemas de proteção contra a corrosão e desgaste aliando bom desempenho e custo baixo.

## **6. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

## **6. Sugestão para Estudos Futuros**

- Estudo do comportamento do revestimento utilizando materiais de selagem (pós-tratamento);
- Utilização de arames com diâmetros diferentes para proporcionar diferentes taxas de deposição;
- Utilização de materiais de adição diferentes, por exemplo, ligas fusíveis;
- Utilização de revestimentos nanoestruturados;
- Ampliação da faixa de temperatura para o processo de tratamento térmico;
- Estudo do comportamento dos revestimentos quanto à corrosão atmosferas diferentes do NaCl 3,5%;
- Realização de ensaios de adesividade do revestimento ao substrato.
- Realização de ensaios em câmara de névoa salina.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Clara, M. S. Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem - Soldagem de Revestimentos. São Paulo, FATEC, 2002, Mód. 2, p. 2-16.
- [2] SCHIEFLER Fo, M.F.O. Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspensão térmica. Florianópolis, 2004. 281p. (Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica / UFSC).
- [3] ROBERGE, P.R. Handbook of Corrosion Engineering. USA, McGraw-Hill, 2000. 1149p.
- [4] MARQUES, P.V. Aspensão Térmica. Infosolda. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>> Acesso em: janeiro de 2006.
- [5] DORFMAN, M.R., NOVINSKI, E. Let's talk thermal spray, the basics of thermal spraying. Metco/Perkin Elmer, Westbury / New York, march 1993.
- [6] DAVIS, J. R., Handbook of Thermal Spray Technology . OHIO, USA: ASM International. 2004 cap.1.
- [7] LIMA, C.R.C., TREVISAN, R.E. Aspensão térmica – fundamentos e aplicações. São Paulo, Artiliber, 2002, 148p.
- [8] GORDON ENGLAND, THERMAL SPRAY COATINGS. Disponível em: <<http://www.gordonengland.co.uk/corrosion.htm>> Acesso em: 30 de outubro de 2006.
- [9] WAINER, E., BRANDI, S.D., MELO, F.D.H. Soldagem Processos e Metalurgia. São Paulo, Blucher, 1992, 494p.
- [10] INTRATER, J. A new metal spray option. Welding Journal, v.81, No11, 2002.
- [11] ZHAO, L., LUGSCHEIDER, E. Influence of the spraying on the properties of 316L stainless steel coatings. Surface and Coatings Technology, 162, 6-10, 2002.
- [12] STOKES, J. The theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. Disponível em: <<http://www.webpages.dcu.ie/~stokesjt/thermalspraying/book/hvofthermalspraying.htm>> Acesso em: fevereiro de 2006.
- [13] SURFACE ENGINEERING, ASM Handbook. Ohio, USA. ASM International, 1987, Vol.5.
- [14] DAVIS, J.R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Ohio, USA. ASM International, 2001, 288p.
- [15] STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR. Engineering Tribology. Great Britain, Butterworth-Heinemann, 2000. cap 10.

- [16] KENNETH, H., MATTHEWS, A. Tribological Properties of Metallic and Ceramic Coatings. In: STOLARSKI, T.A. Modern Tribology Handbook. Great Britain, Butterworth-Heinemann, 2000. cap 23.
- [17] BHUSHAN, B. Handbook of micro and nanotribology. Flórida, USA. CRC Press LLC, 1999. Vol 1, cap 1.
- [18] STOLARSKI, T.A. Tribology in Machine Design. Great Britain, Butterworth-Heinemann, 2000. cap 2.
- [19] COST OF CORROSION. Disponível em: <<http://www.corrosioncost.com>> Acesso em: 01 de dezembro de 2006.
- [20] GENTIL, V. Corrosão. 4ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003. 341p.
- [21] ZEEMANN, A. Corrosão em juntas soldadas. Infosolda. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol08.pdf>> Acesso em: janeiro de 2006.
- [22] MARCHIORI, R. Resistência à corrosão de ferro puro enriquecido superficialmente com cromo, níquel ou titânio, depositados durante a sinterização por plasma. Florianópolis, 2003. 118p. (Mestrado – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais / UFSC).
- [23] DAVIS, J.R. Corrosion, understanding the basics. ASM International. Ohio, USA. 2000, cap. 1.
- [24] MOREIRA, R. M. Avaliação da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 13Cr e 13Cr-5Ni-2Mo em meios úmidos de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S presentes em colunas de produção de petróleo. Florianópolis, 2004. 202p. (Tese – Departamento de Química / UFSC).
- [25] PASCHOAL, A.L. Avaliação da resistência à corrosão em meio fisiológico de metais revestidos com nitreto de titânio. São Carlos, 1998. 129p. (Mestrado – Instituto de Física / Instituto de Química / USP).
- [26] TALBOT, D.E.J., TALBOT, J.D.R. Corrosion Science and Technology. ed. 1. Flórida, USA. CRC Press LLC, 1998. 432p.
- [27] CORROSION, ASM Handbook. Ohio, USA. ASM International, 1987, Vol. 13.
- [28] INLAC. Catálogo de Produto – Aço Inoxidável. São Paulo, 2006. 6p.
- [29] CALLISTER JR., W.D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002, cap 12.

- [30] SMITH, W.F. Princípios de ciência e engenharia de materiais. 3 ed. Lisboa: Rio de Janeiro, Mc Graw-Hill, 1996. cap 9.
- [31] AGUIAR, F.E.C. Estudo eletroquímico da corrosão em chapas de aço galvanizado e fosfatizado por coil-coating. Guaratinguetá, 2003. 91p. (Mestrado – Departamento de engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista).
- [32] SOFT CORR III CORROSION MEASUREMENT SOFTWARE. Instruction Manual, Perkin Elmer Instruments Inc. Massachusetts, USA, 2000.
- [33] COELHO, A.S. Estudo de inibidores de corrosão em meios ácidos – formulação para misturas de ácidos acético, fórmico e fluorídrico. Rio de Janeiro, 2005. 95p. (Mestrado – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / COPPE / UFRJ).
- [34] CARDOSO, S.P. Avaliação experimental e teórica de potenciais inibidores de corrosão para aços em ácido clorídrico. Rio de Janeiro, 2005. 165p. (Doutorado – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / COPPE / UFRJ).
- [35] AGUILA, J.F.V. Um estudo para proteção de ponteiros de “risers”. Florianópolis, 2005. 79p (Mestrado- Departamento de Engenharia Mecânica / UFSC).
- [36] WOLYNEC, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo. 2003, 166p.
- [37] STOKES, J. Production of coated and free-standing engineering components using the HVOF process. Disponível em: <[http://www.webpages.dcu.ie/~stokesjt/thermalspraying/thesis/jstokesphd\\_thesis.htm](http://www.webpages.dcu.ie/~stokesjt/thermalspraying/thesis/jstokesphd_thesis.htm)> Acesso em: fevereiro de 2006.
- [38] SULZERMETCO. Thermal Spray. Disponível em: <<http://www.sulzermetco.com>> Acesso em: 24 de outubro de 2006.
- [39] HALLDEARN, R. Arc Thermal Spray Process. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk>> Acesso em: 30 de outubro de 2006.
- [40] ASTM E1920 03. Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings. ASTM 2003
- [41] ASTM B487 02. Standard Test Method for Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of a Cross Section. ASTM 2002
- [42] ASTM E562 02. Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. ASTM 2002

- [43] NBR ISO 4287 02. Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 2002.
- [44] MITUTOYO. Rugosidade Superficial: Análise do Parâmetro Ra. Mitutoyo News, São Paulo. 2000, No 40.
- [45] DIETER, G.E. Metalurgia Mecânica. 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981, 653p.
- [46] SOUSA, L.L. Caracterização microestrutural e resistência à corrosão de ligas Ni-Cr-Mo refundidas utilizadas em próteses dentárias. Guaratinguetá – S.P., 2005. 140p. (Mestrado – Faculdade de Engenharia / Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista).
- [47] FERREIRA, M.C. Preparo de amostras para a realização do teste de microdureza. Apostila de aula, Laboratório de Pesquisa. Florianópolis. 2004. Departamento de Estomatologia. UFSC. 29p.
- [48] ASTM E384 99. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM 1999
- [49] ASTM G99 04. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus. ASTM 2004
- [50] ASTM G59-97. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM 1997
- [51] DUAN, D.L., LI, S., DUAN, X.H., LI, S.Z. Wear behavior of thermally sprayed coatings under different loading conditions. Tribology Transactions, V.48, No1, jan/mr 2005.

## **8. APÉNDICE**

### 8.1 Apêndice A – Ensaios Eletroquímicos

As figuras a e b apresentam os resultados referentes aos ensaios de curvas de Tafel para a base Ni+4Al e também a curva de Tafel para um comportamento ideal para faixa de varredura aplicada. A figura c apresenta a repetibilidade dos ensaios de polarização potenciodinâmica anódica, em especial para o revestimento AISI 420.

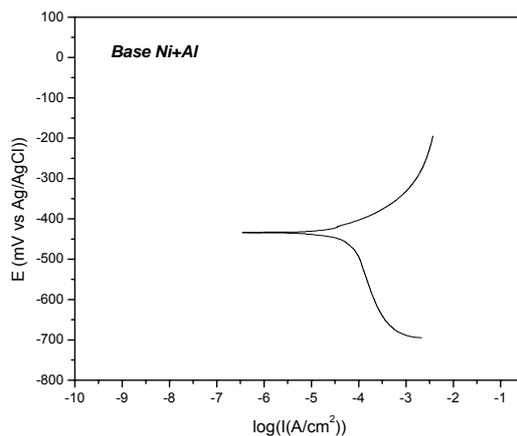


Figura a. Curva de Tafel - Revestimento Base Ni+4Al

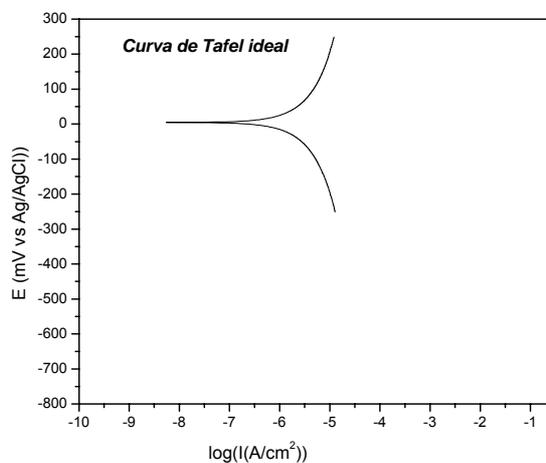


Figura b. Curva de Tafel – Comportamento ideal e repetibilidade dos ensaios dos revestimentos.

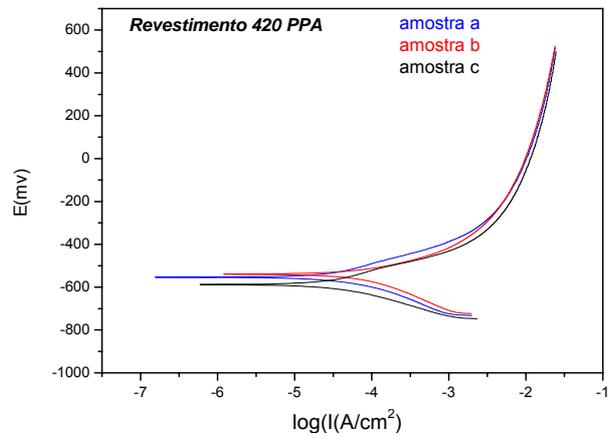


Figura c. Ensaio de PPA – Repetibilidade dos ensaios do revestimento AISI 420.

### **Apêndice B - Trabalhos Desenvolvidos**

**- III CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – Universidade Federal do Pará – Belém, PA - Agosto 2004.**

*Síntese do Compósito Al+NbAl<sub>3</sub> obtido por Metalurgia do Pó;*

**- IV CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE - Agosto 2006.**

*Estudo das Propriedades do Revestimento Duro ligado ao Cr-Mo-V-W aplicado pelo processo de Soldagem Arco Submerso (Saw) utilizando Arame Tubular e Fluxo Neutro;*

**- 17° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (S.P.) – Foz do Iguaçu - Novembro 2006.**

*Estudo dos Revestimentos de Aço Inoxidável AISI 316L e AISI 420 depositados pelo Processo de Aspersão Térmica Arc Spray (As);*

**- 6° CONGRESSO BINACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES – Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile – Santiago, Chile – Nov/Dez 2006.**

*Estudo das Propriedades do Revestimento Duro ligado ao Cr-Mo-V-W aplicado pelo processo de Soldagem Arco Submerso (Saw) utilizando Arame Tubular e Fluxo ;*

### **9.2 Trabalhos em Congressos Futuros**

**- 62° CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS — Vitória, ES – Jul/2007.**

*Comportamento ao Desgaste de Superfície do Aço ABNT/SAE 1010 Revestido por Aço Inoxidável através do Processo de Aspersão Térmica Arc Spray (AS);*