



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**  
**METALÚRGICA E DOS MATERIAIS – PPGE3M**

**DESENVOLVIMENTO DE NOVOS REVESTIMENTOS POR ASPERSÃO TÉRMICA  
À ARCO PARA PROTEÇÃO CONTRA DESGASTE EROSIVO EM TROCADORES DE  
CALOR AR/GASES**

**RODRIGO CARDOSO COSTA**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

**PORTO ALEGRE,  
2012**

RODRIGO CARDOSO COSTA

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS REVESTIMENTOS POR ASPERSÃO TÉRMICA  
À ARCO PARA PROTEÇÃO CONTRA DESGASTE EROSIVO EM TROCADORES DE  
CALOR AR/GASES

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M, da Universidade federal do Rio Grande do Sul. Orientador Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha.

Área de Concentração: Processos de fabricação

PORTO ALEGRE,  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela banca examinadora do Curso de Pós-graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Norton Zanette Kejelin

Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias

Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

PORTO ALEGRE, 01 de novembro de 2012

*Dedico este trabalho*

*A minha esposa Paula  
e minhas filhas, Sophia e Julia*

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, Pai de toda criação. Pela graça da minha vida saúde e família.

Ao prof. Dr, Alexandre da Silva Rocha por toda orientação prestada.

Com muito orgulho ao Prof. Dr. Norton Zanette kejelin, por ter apostado na minha pessoa, pelos constantes incentivos e pelo apoio incondicional durante a realização do mestrado.

Ao Msc Eng. Sr. Franco Wronski Comeli por acreditar na competência dos pesquisadores e bolsistas que fizeram parte do projeto de pesquisa ANEL-TRATEBEL (PD-0403-0012/2010). E a empresa TRACTEBEL ENERGIA pelo financiamento deste estudo.

Aos professores Msc Fernando Michelon Marques e Msc Richard de Medeiros Castro, pelo forte companherismo. E em especial ao professor Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler por sua incondicional orientação na elaboração dessa dissertação.

Aos amigos Eng. Brainer Rodrigues Martins, Lucas Cardoso Milak e Michel Volpato da Coregio, pelo comprometimento com o projeto de pesquisa que originou esse trabalho, e aos bons momentos de descontração.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais- PPGE3M da Universidade Federal de Rio Grande do Sul- UFRGS.

A Faculdade SATC.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste sonho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAs .....	XI
LISTA DE símbolos e ABREVIATURAS .....	XII
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Fluxograma do plano de dissertação .....	2
1.2 Apresentação da empresa Tractebel energia .....	3
1.3 Caracterização do problema .....	4
1.4 Caracterização das cinzas leves .....	6
1.5 Objetivo geral.....	7
1.6 Objetivos específicos .....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
2.1 Aço baixa liga ASTM A-178.....	8
2.2 Mecanismos de desgaste .....	8
2.2.1 Desgaste erosivo .....	9
2.2.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas .....	11
2.3 Processos de aspersão térmica .....	12
2.3.1 Aspersão térmica por Arco Elétrico.....	14
2.4 Revestimento de AISI 420 metalizado por <i>Arc Spraying</i> .....	16
2.5 Revestimento a base de Ni-Cr metalizado por <i>Arc Spraying</i> .....	17
2.6 Revestimento a base de WC metalizado por <i>Arc Spraying</i> .....	19
2.7 Preparação da superfície para aspersão térmica.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
3.1 Montagem da bancada de aspersão .....	21

3.2	Equipamento de aspersão térmica.....	24
3.3	Preparação das amostras .....	25
3.3.1	Amostra para ensaio de dobramento e metalografia.....	26
3.3.2	Amostras para o ensaio de desgaste erosivo.....	27
3.4	Preparação superficial das amostras.....	28
3.4.1	Medição da rugosidade .....	30
3.5	Metalização dos revestimentos .....	31
3.5.1	Caracterização dos consumíveis .....	32
3.5.2	Metalização para o ensaio de dobramento.....	32
3.5.3	Metalização para o ensaio de erosão.....	34
3.6	Preparação metalográfica .....	34
3.7	Análise por microscopia óptica.....	36
3.8	Análise de microdureza.....	37
3.9	Ensaio de dobramento .....	38
3.10	Ensaio de desgaste erosivo por partículas sólidas.....	40
3.11	Estudo do ciclo térmico de aspersão .....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Resultados preliminares .....	43
4.1.1	Parâmetros operacionais de aspersão.....	43
4.1.2	Gás de atomização .....	45
4.1.3	Rugosidade superficial do substrato .....	46
4.1.4	Ciclo térmico em aspersão térmica a arco .....	48
4.1.5	Ensaio de dobramento.....	50
4.1.6	Análise microestrutural.....	53
4.2	Ensaio de desgaste erosivo por partículas sólidas.....	55
4.3	Estudo econômico .....	64
5	CONCLUSÕES .....	66
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma da dissertação .....	3
Figura 1.2 Trocador de calor casca e tubo.....	4
Figura 1.3 Problemas nos trocadores de calor .....	5
Figura 2.1 Tipos de desgastes .....	9
Figura 2.2 Comportamento da taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis.....	11
Figura 2.3 Mecanismo de desgaste erosivo em materiais frágeis.....	12
Figura 2.4 Processo de aspersão térmica .....	12
Figura 2.5 Esquema de representação do material aspergido sobre substrato.....	13
Figura 2.6 Esquema de aspersão térmica por arco elétrico .....	14
Figura 2.7 Atomização do material consumível dos revestimento em forma de arame.....	15
Figura 2.8 Metalização de AISI 420 .....	16
Figura 2.9 Inclusão de óxido em revestimento metálico de AISI 420.....	17
Figura 2.10 Microestrutura típica de revestimento Ni-Cr depositados <i>por Arc Spraying</i> ...	18
Figura 2.11 Inclusão de porosidade em revestimento Ni-Cr depositados <i>por Arc Spraying</i> . .....	18
Figura 2.12 Microestrutura da superfície do revestimento a base de WC metalizado por <i>Arc Spraying</i> .....	19
Figura 3.1 Sistema de fixação das amostras tubulares .....	22
Figura 3.2 Mesa de deslocamento da tocha de aspersão .....	23
Figura 3.3 Bases para posicionamento e fixação da tocha .....	23
Figura 3.4 Sistema de captação de gases e fumos .....	24
Figura 3.5 Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico .....	24
Figura 3.6 Dimensões das amostras .....	26
Figura 3.7 Detalhe do pré-corte das amostras .....	26
Figura 3.8 Amostras aspergidas.....	27
Figura 3.9 Corpo de prova para ensaio erosivo .....	27
Figura 3.10 Fixação das amostras no tubo .....	28
Figura 3.11 Equipamentos para texturização superficial das amostras .....	29

Figura 3.12 Apoio para os tubos.....	29
Figura 3.13 Medição de rugosidade média (Ra) .....	30
Figura 3.14 Fluxograma do procedimento de metalização das amostras .....	31
Figura 3.15 <i>Software Image Tool</i> para medir a espessura de camada .....	36
Figura 3.16 <i>Software Image Tool</i> para medir o índice de porosidade .....	37
Figura 3.17 Contraste entre poro e lamela metalizada .....	37
Figura 3.18 Perfil de microdureza .....	38
Figura 3.19 Estrutura para ensaio de dobramento .....	39
Figura 3.20 Ensaio de dobramento .....	39
Figura 3.21 Ensaio de dobramento .....	40
Figura 3.22 Equipamento para ensaio erosivo.....	40
Figura 4.1 Oscilograma para aspersão térmica.....	44
Figura 4.2 Atomização de material AISI 420. ....	44
Figura 4.3 Partículas não fundidas em revestimento AISI 420 aspergido.....	45
Figura 4.4 Fluxo de gás para atomização aplicado sobre papel absorvente .....	45
Figura 4.5 Micrografia de revestimento AISI 420.....	46
Figura 4.6 Rugosidade superficial das amostras .....	47
Figura 4.7 Adesão de metalização ao substrato .....	47
Figura 4.8 Ciclo térmico do substrato sem pré-aquecimento .....	48
Figura 4.9 Ciclo térmico do substrato com pré-aquecimento.....	49
Figura 4.10 Influência da potência elétrica do arco elétrico sobre a temperatura do substrato.....	49
Figura 4.11 Deslocamento do revestimento por alta potência do arco elétrico .....	50
Figura 4.12 Metalização sobre camada base .....	50
Figura 4.13 Teste de dobramento.....	51
Figura 4.14 Característica superficial do revestimento após ensaio de dobramento.....	51
Figura 4.15 Ensaio de dobramento com diferentes espessuras de camada metalizadas.....	52
Figura 4.16 Ensaio de dobramento com os melhores resultados.....	53
Figura 4.17 Índice de porosidade entre os materiais dos revestimentos. ....	54
Figura 4.18 Secção transversal digital do revestimento AISI 420 da região desgastada a 30° .....	56
Figura 4.19 Comparativo da taxa de erosão entre os revestimentos aspergidos e o aço ASTM A-178.....	57
Figura 4.20 Taxa de erosão em ensaios de desgaste a 90° .....	58

Figura 4.21 Influência da porosidade contida sobre a taxa de erosão .....	59
Figura 4.22 Micrografias ópticas dos revestimentos .....	59
Figura 4.23 Micrografias ópticas dos revestimentos .....	60
Figura 4.24 Superfície da amostra do aço ASTM A-178 após ensaio de erosão acelerada. 61	
Figura 4.25 Corpo de prova com ganho de massa.....	61
Figura 4.26 Mecanismo de desgaste erosivo a 30° .....	62
Figura 4.27 Mecanismo de desgaste erosivo a 90° .....	63
Figura 4.28 Superfície do revestimento com Metco SM 8297 erodido a 90° .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Análise química das cinzas leves do carvão Bonito.....	6
Tabela 2.1 Composições química dos tubos ASTM A-178 .....	8
Tabela 2.2 Classificação dos processos de aspersão térmica com relação ao modo de aquecimento.....	14
Tabela 3.1 Identificação das amostras para cada consumível .....	30
Tabela 3.2 Parâmetros de jateamento para texturização.....	30
Tabela 3.3 Composição química nominal dos consumíveis .....	32
Tabela 3.4 Parâmetros operacionais fixos da bancada de aspersão térmica .....	32
Tabela 3.5 Parâmetros de metalização para metalografia e ensaio de dobramento.....	33
Tabela 3.6 Parametrização do revestimento base .....	34
Tabela 3.7 Parâmetros de metalização para ensaio de erosão .....	34
Tabela 3.8 Descrição das sequências de lixamento .....	35
Tabela 3.9 Parâmetros utilizados no ensaio de erosão.....	41
Tabela 3.10 Parâmetros operacionais de aspersão estudo do ciclo térmico .....	42
Tabela 4.1 Parâmetros operacionais Arc Spraying .....	43
Tabela 4.2 Rugosidade das amostras para ensaio ASTM G-76.....	48
Tabela 4.3 Critério para avaliação a resistência da adesão do revestimento aspergido.....	52
Tabela 4.4 Resultados das medições e espessura de camada metalizada, microdureza e porosidade.....	54
Tabela 4.5 Relação de densidades e porosidade dos materiais estudados .....	55
Tabela 4.6 Superfície das amostras pós-ensaio de erosão nos ângulos de incidência de 30° e 90° .....	56
Tabela 4.7 Resultados obtidos no teste de erosão por partículas sólidas.....	57
Tabela 4.8 Consumo de energia elétrica operacional .....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

## Alfabeto grego

$\Theta$	[°]	Ângulo de ataque do erodente
$\rho_{ap}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade do revestimento

<i>AISI</i>		<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>AS</i>		<i>Arc Spraying</i>
<i>ASTM</i>		<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>AWS</i>		<i>American Welding Socite</i>
<i>CC -</i>		Corrente contínua negativa
<i>CC +</i>		Corrente contínua positiva
<i>CCC</i>		Cúbico de corpo centrado
<i>CTJL</i>		Complexo Termelétrico Jorge Lacerda
<i>ER</i>		<i>Electrode Rod</i>
<i>HB</i>		<i>Hardness Brinell</i>
<i>HRB</i>		<i>Hardness Rochwell B</i>
<i>HV</i>		<i>Hardness Vickers</i>
<i>HVOF</i>		<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
máx		Máximo
MEV		Microscópio Eletrônico de Varredura
$m_f$	[g]	Massa final da amostra
$m_i$	[g]	Massa inicial da amostra
mim		Minuto
<i>PS</i>		<i>Plasma Spraying</i>
Si		Silício
SM		Sulzer Metco
$T_v$	[cm <sup>3</sup> /g]	Taxa de erosão volumétrica
UTLB		Usina Termelétrica Jorge Lacerda B

## RESUMO

Uma alternativa à utilização de tubos de alto custo, resistentes a erosão por partículas sólidas, nos trocadores de calor ar/gases de usinas termelétricas a carvão, é o revestimento por aspersão térmica com ligas especiais de média a alta dureza. Dentre os processos de aspersão térmica, os mais usualmente empregados para a deposição de revestimentos contra desgaste são por HVOF (*High-Velocity Oxyfuel*), PS (*Plasma Spraying*) e AS (*Arc Spraying*). O processo aspersão térmica a arco (AS) propicia alta produtividade devido a uma maior taxa de deposição quando comparado com os outros processos, além do custo operacional significativamente mais baixo para a fabricação de revestimentos. Neste trabalho, foram depositadas por AS quatro ligas metálicas contra o desgaste erosivo a base de carboneto de tungstênio, superligas de níquel, ligadas ao boro e aço inoxidável martensítico em comparação ao aço ASTM 178 grau A, o qual é atualmente empregado nos tubos do trocador de calor. A avaliação foi feita a partir de ensaios de erosão acelerada (norma ASTM G76), metalografia e MEV. Verificou-se que o comportamento dos revestimentos contendo grande quantidade de defeitos, principalmente porosidade, quando expostos ao desgaste acelerado numa temperatura de 370°C, apresentaram uma maior taxa de desgaste em relação ao aço ASTM A178, e que o melhor comportamento dentre as ligas analisadas foi do aço inoxidável AISI 420 aspergido, o qual apresentou aproximadamente 2% de porosidade e um mecanismo de remoção de material predominantemente dúctil.

Palavras-chave: Aspersão Térmica; Desgaste Erosivo; *Arc Spraying*, Trocador de Calor Ar/Gases.

## ABSTRACT

*An alternative to using tubes of expensive materials, resistant to erosion by solid particles in air-gases heat exchangers of coal power plants, is the thermal spray coatings with special alloys of medium to high hardness. Among the thermal spray processes, the most commonly employed for coatings against wear are HVOF (High-Velocity Oxyfuel), PS (Plasma Spraying) and AS (Arc Spraying). The arc thermal spray process (AS) provides high productivity, due to a higher deposition rate compared to other processes, in addition to the significantly lower operational cost. In this study four different alloys were deposited to evaluate the erosive wear resistance in comparison to the ASTM 178 Grade A steel (currently employed in the tubes of the heat exchanger): 1) with basis of tungsten carbide, 2) nickel superalloys 3) alloyed to Boron, and 4) martensitic stainless steel. The evaluation was made from accelerated erosion tests (ASTM G76), OM, SEM and Vickers micro hardness tests. It was found that the behavior of coatings containing large amounts of defects, mainly porosity, when exposed to accelerated wearing in a temperature of 370 °C showed a higher wear rate than the ASTM A178 and that the best performance among the alloys sprayed was the stainless steel AISI 420, which showed about 2% of porosity and a material removal mechanism predominantly ductile.*

*Key-words: Thermal spray; Erosive wear; Arc spraying, Ar / gases heat exchanger.*

## 1 INTRODUÇÃO

No setor elétrico, assim como em qualquer atividade industrial, a confiabilidade operacional dos diversos equipamentos é de fundamental importância para o atendimento da produção. Para o setor elétrico esse item é de máximo interesse, devido às perdas monetárias diretas e indiretas, decorrentes da suspensão dos serviços e multas.

Numa planta geradora termoelétrica, existem muitos fatores dentro do processo de geração, que dificultam o alcance dos índices de produção esperados pela administração, como: isolamento térmico dos dutos de vapor, desgaste acelerado das hastes das válvulas para abertura de gás da caldeira, podendo-se destacar o fenômeno de erosão nos tubos dos trocadores de calor dos pré-aquecedores de ar da caldeira (JUNIOR, 2008).

As plantas termoelétricas geralmente utilizam o carvão mineral como fonte de energia, onde o calor liberado pela queima desse material fóssil produz dentro das caldeiras, a quantidade de vapor necessário para alimentar as turbinas geradoras de energia. A eficiência do equipamento de geração, conta com o pré-aquecimento do ar que será utilizado na queima do carvão. Esse pré-aquecimento é realizado dentro de trocadores de calor tipo tubo e carcaça, onde o gás produzido pela queima do carvão é forçado a passar entre tubos de aço, os quais internamente conduzem o ar para a caldeira. A troca de calor acontece por condução térmica entre a parede dos tubos.

Aproximadamente 60 a 80% da cinza resultante da queima do carvão saem da fornalha junto aos gases da combustão, e a erosão por cinzas dos tubos dos trocadores de calor, é uma das principais causas da perda de produtividade em plantas que utilizam esse tipo combustível (SILVEIRA, 2008).

O fenômeno da erosão por sua vez está ligado à abrasividade das cinzas, a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de ferro hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pois são os componentes presentes na cinza seca leve que mais contribuem para a erosão. As partículas desses componentes num fluxo de velocidade constante acabam provocando o desgaste contínuo nos tubos, conduzindo a perfuração dos mesmos (ANGIOLETO, 2009).

Algumas estratégias de manutenção corretivas e preventivas são adotadas no sentido de minimizar os problemas de desgaste por erosão. Normalmente os reparos corretivos consistem no encamisamento interno do tubo trocador de calor, ou a desativação do duto danificado. Já, as práticas preventivas podem se destacar: utilizar em operação tubos metálicos mais espessos, ou com algum revestimento metálico (ANGIOLETO, 2007).

A aplicação de revestimentos metálicos na superfície externa dos tubos pode ser aplicada pelo processo de aspersão térmica. Esse processo consiste na deposição de material metálico ou não metálico sobre um substrato na condição fundida ou semifundida, para formação de uma camada superficial no substrato com características químicas e mecânicas diferentes do material de base. O processo de aspersão térmica pode ser aplicado por várias técnicas, onde a técnica por *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) e *Arc Spray*, são os que apresentam maior desempenho ao desgaste por erosão, em ensaios realizados nos corpos de prova com superfícies recobertas por essas técnicas (MARQUES, 2003).

Esse estudo pretende investigar o desempenho dos revestimentos aspergidos: aço inoxidável AISI 420 (Metcoloy 2<sup>®</sup>), WC-TiC (Metco SM 8297<sup>®</sup>); Fe-Cr-B (Eutectic 595T<sup>®</sup>) e o Ni-Cr-Mo (Incoloy 625<sup>®</sup>), sobre um substrato (tubo) de aço ASTM A-178, frente ao mecanismo de desgaste por erosão de partículas sólidas. Com a realização dos ensaios de erosão acelerada, pretende-se determinar o revestimento de melhor desempenho.

### 1.1 Fluxograma do plano de dissertação

Como forma de orientação geral para determinar as etapas de pesquisa e desenvolvimento desde trabalho, foi esquematizado um fluxograma conforme a figura 1.1.

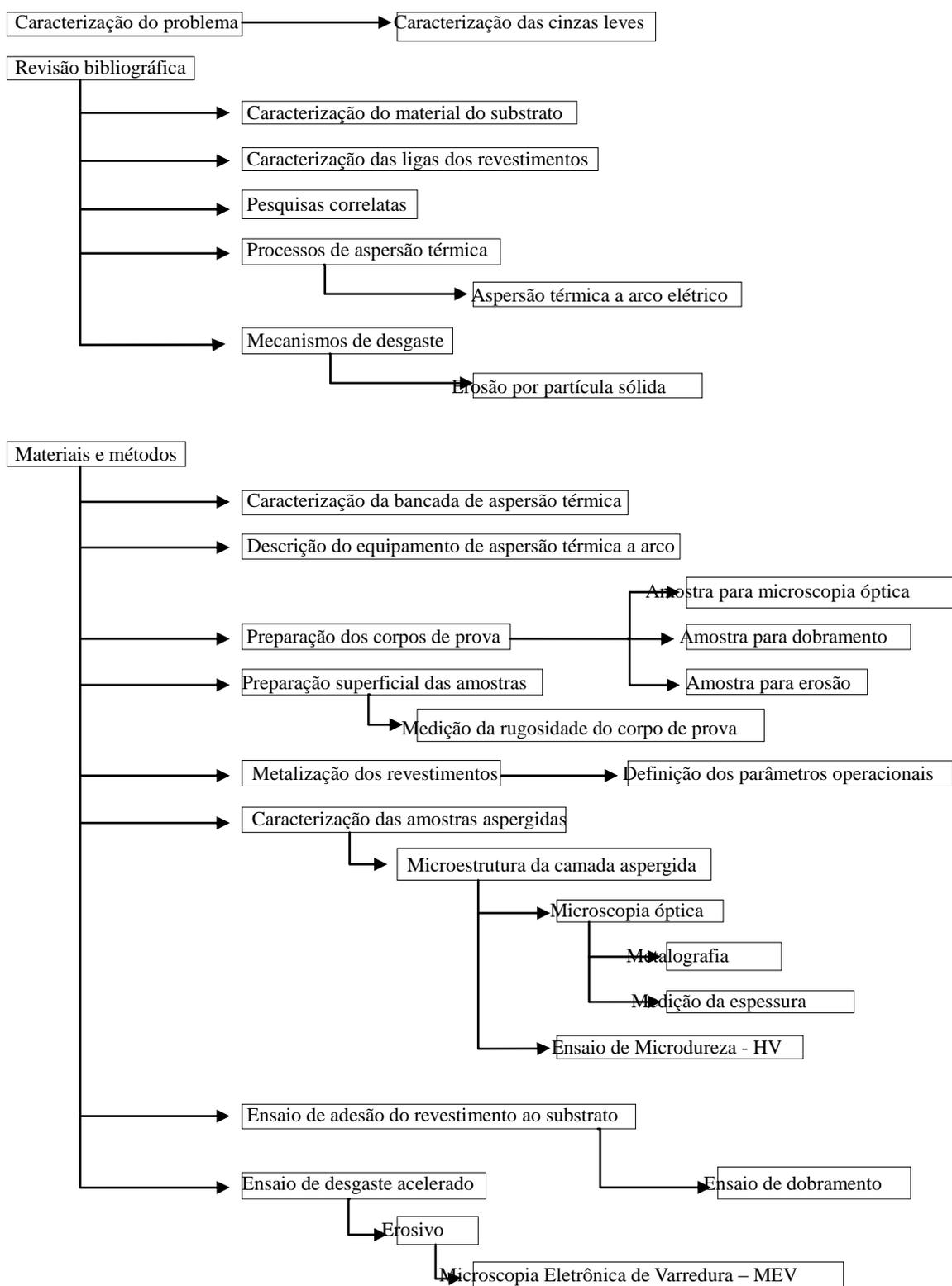


Figura 1.1 Fluxograma da dissertação

## 1.2 Apresentação da empresa Tractebel energia

A empresa Tractebel Energia atualmente é controlada pelo grupo *International Power GDF SUEZ*. Essa empresa atua na implantação e operação de usinas geradoras de

eletricidade, sendo também agente ativo na atividade de comercialização de energia elétrica, o que torna essa empresa a maior geradora privada de energia do Brasil. A Companhia é sediada em Florianópolis-SC, e suas usinas encontram-se instaladas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí e Ceará.

O complexo Termoeletrico Jorge Lacerda atualmente pertence à empresa Tractebel energia, e este se localiza no município de Capivari de Baixo-SC. A esse complexo é atribuído o conceito de maior complexo termoeletrico a carvão da América Latina. O complexo possui em funcionamento três usinas térmicas, as quais possuem uma produção superior a 800 MW, de energia elétrica.

### 1.3 Caracterização do problema

Os aquecedores tubulares ou trocadores de calor, da Usina Termelétrica Jorge Lacerda B – UTLB, unidades 5 e 6 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda - CTJL podem ser observados na figura 1.2(a). Esses trocadores de calor são do tipo recuperativo de fluxo cruzado (casco e tubo). Esses equipamentos têm por finalidade promover a troca térmica entre os gases resultantes da queima do carvão da caldeira, com o elemento comburente na queima do carvão (ar).

Para melhor identificação os bancos dos aquecedores do trocador de calor tubular são nomeados com as letras A, B, C e D conforme a figura 1.2(b). Essa mesma figura também mostra a representação da entrada e saída dos gases e do ar.

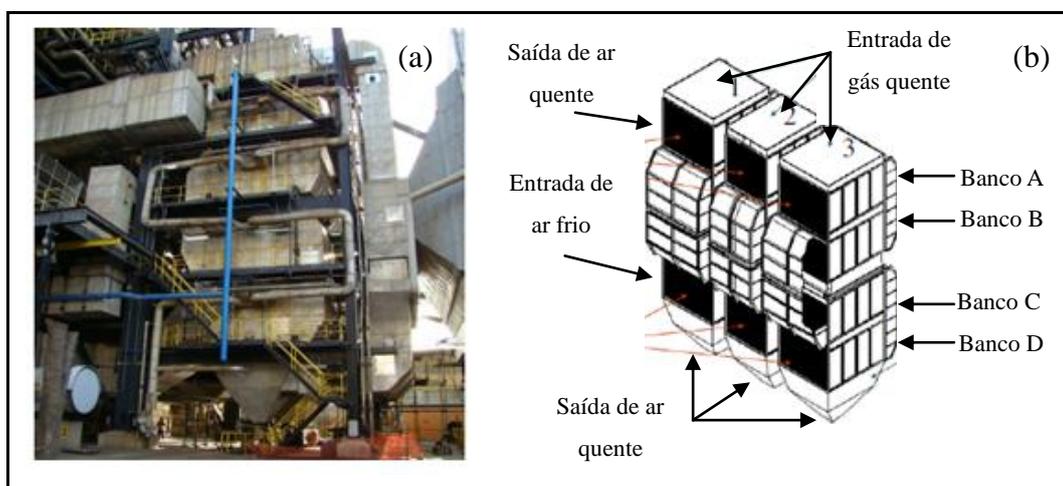


Figura 1.2 Trocador de calor casca e tubo. (a) Aquecedor tubular da UTLB. (b) Identificação dos bancos e dos aquecedores, Fonte: Tractebel Energia (2010).

Os tubos que compõem esse equipamento possuem as seguintes especificações técnicas:

- Material: Aço ASTM A-178;
- Especificação dimensional: diâmetro de 57,15 mm, espessura de parede 2,5 mm e comprimento de 4000 mm;

As características técnicas do aquecedor tubular e os dados operacionais são:

- Quantidade de tubos instalados: 20160;
- Quantidade de aquecedores: 3;
- Quantidade de bancos por aquecedor: 4;
- Temperatura do ar: 40 °C na entrada (parte inferior) e 290 °C na saída (parte superior).
- Temperatura dos gases: 370 °C na entrada (parte superior) e 160 °C na saída (parte inferior).

De uma forma geral, os sistemas de trocadores de calor do tipo casco e tubos de usinas termoeletricas a carvão, e principalmente os tubos desse sistema, normalmente apresentam dois problemas críticos: perfuração por ação erosiva das cinzas leves conforme figura 1.3 (a), e perfuração por ação corrosiva dos compostos gerados na combustão do carvão mineral, conforme figura 1.3(b).

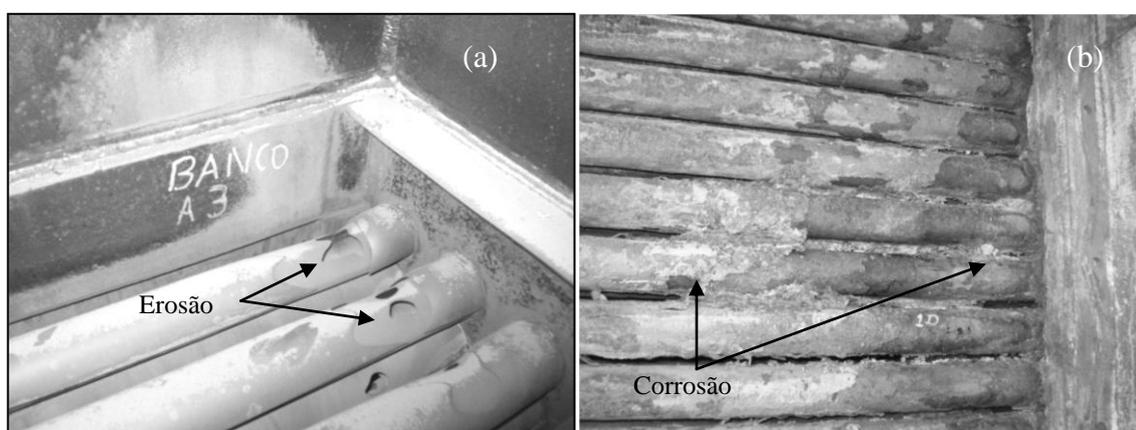


Figura 1.3 Problemas nos trocadores de calor. (a) Desgaste erosivo, (b) Desgaste corrosivo

Uma vez que os tubos são perfurados, por erosão ou corrosão, estes devem ser submetidos a algum tipo de reparo. A solução comumente adotada é a introdução de outro tubo no interior do primeiro, ou numa situação mais drástica, é efetuado o tamponamento das vias perfuradas. Dessa forma reduz-se a eficiência de troca térmica, com o aumento da área fechada ou inoperante dentro do sistema de trocador de calor.

Para reduzir estes tipos de problemas são necessários alguns estudos, como por exemplo, desenvolver novos revestimentos por aspersion térmica à arco para a proteção contra corrosão e desgaste erosivo nestes trocadores de calor. O entendimento dos mecanismos de desgaste também é de fundamental importância, para a seleção dos consumíveis aplicados na fabricação dos revestimentos aspergidos. Uma vez que estes revestimentos irão determinar as propriedades de resistência mecânica e química, compatíveis com esses problemas, aumentando assim a confiabilidade e a eficiência na geração de energia termoelétrica a carvão.

#### 1.4 Caracterização das cinzas leves

O carvão utilizado na Tractebel possui alto teor de cinzas (cerca de 44%) e poder calorífico de  $4500 \text{ kcal/kg}$ , além de elevado teor de enxofre. Aproximadamente 60 a 80% da cinza resultante da queima do carvão saem da fornalha com os gases da combustão, ocasionando problemas de desgaste intensos e localizados (ANGIOLETO, 2009).

Devido ao elevado teor de cinzas leves, o mecanismo de desgaste erosivo por partículas sólidas se torna predominante na entrada de gás de combustão do trocador de calor, conforme pode ser observado na figura 1.3 (a). Esta erosão causa um descontrole da manutenção, perda de rendimento e um alto custo global operacional.

As características principais da cinza produzida pela queima do carvão Bonito encontram-se descritas na tabela 1.1.

Tabela 1.1 Análise química das cinzas leves do carvão Bonito. Fonte: ANGIOLETO, (2009)

Grandezas	Valores
Peso específico	$2,1 \text{ g/cm}^3$
Sílica ( $\text{SiO}_2$ )	55,2 %
Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	11,5%
Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	31,6%
Cálcio ( $\text{CaO}$ )	0,7%
Magnésio ( $\text{MgO}$ )	0,4%
Sulfatos ( $\text{SO}_3$ )	0,5%

### 1.5 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivos avaliar o comportamento de diferentes revestimentos metálicos aspergidos por *Arc Spraying*, frente à ação do desgaste erosivo por partículas sólidas.

### 1.6 Objetivos específicos

- Avaliar a qualidade da adesão das amostras metalizadas, dentro dos critérios de aceitação da norma Petrobras N-2568;
- Produzir uma camada aspergida no substrato com espessura total de 0,4 mm;
- Definir como ótimo os parâmetros operacionais de aspersão térmica a arco, como tensão e corrente elétrica;
- Avaliar o índice de porosidade do material aspergido, frente à resistência ao mecanismo de desgaste erosivo acelerado por partículas sólidas;
- Entender melhor o mecanismo de desgaste por erosão dos revestimentos aspergidos;
- Identificar o revestimento metálico de menor taxa de erosão;
- Analisar os custos associados à deposição da camada aspergida.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço baixa liga ASTM A-178

A metalurgia entende que os aços liga são formulados a partir de um maior teor de elementos como o Manganês e o Silício, ou ainda, quando são constituídos de outros elementos que normalmente não entram na composição química dos aços carbono, como Nióbio, Vanádio e Tungstênio. De acordo com a porcentagem total de elementos de liga na composição, uma classificação pode ser estabelecida, como: aços de baixa liga (até 5% de elementos de liga); aços de média liga (entre 5% e 10% de elementos de liga); aços de alta liga (acima de 10% de liga) (MARTINS & PEREIRA, 2010).

Algumas normas ASTM, classificam os aços ligas quanto à sua aplicação e/ou a sua composição química, tanto para fins estruturais ou para condução de fluidos pressurizados. Assim a classificação ASTM A-178 é aplicada para tubos de caldeira em aço ARBL carbono-manganês. A tabela 2.1 apresenta a composição química dessa classificação.

Tabela 2.1 Composições químicas dos tubos ASTM A-178, *ASTM Handbook* (2002)

Especificação	Identificação do material	Composição química (%)				
		C	Mn	P	S	Si(min)
ASTM 178	A	0,06 a 0,18	0,27 a 0,63	0,05	0,06	----
	B	0,35	0,8	0,05	0,06	----
	C	0,27	1,0 a 1,5	0,03	0,015	0,10

### 2.2 Mecanismos de desgaste

Estudos e pesquisas conceituam o desgaste, como sendo um processo de degradação de um material quando em serviço, a nível macro e microscópico. Geralmente a degradação de um corpo sólido, é promovida pela perda progressiva de material da superfície, por contato ou movimento relativo de um sólido em relação a outro sólido, líquido ou gás (ZANINI, 2003).

Os três tipos básicos de desgaste geralmente considerados são: desgaste abrasivo, desgaste adesivo e desgaste erosivo (figura 2.1). O tipo abrasivo identificado na figura 2,1(a) ocorre quando partículas duras deslizam, ou são forçadas contra uma superfície em

relação à qual estão em movimento, provocando deslocamento e a remoção de material (TASSI 2010).

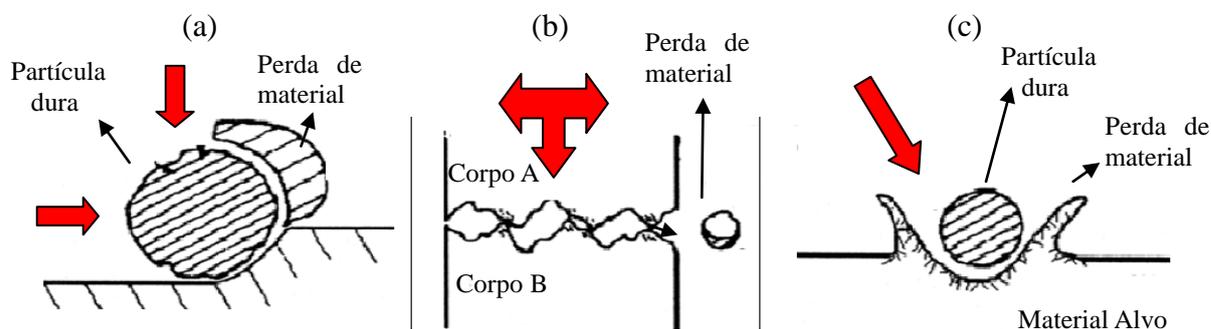


Figura 2.1 Tipos de desgastes: Desgaste abrasivo (a); Desgaste adesivo (b); Desgaste Erosivo (c). Fonte: Modificado de Tassi (2010)

Já o desgaste adesivo conforme a figura 2,1(b) inicia quando duas superfícies em contato por atrito sofrem deformação plástica localizada, ocorrendo uma microfusão no local entre as superfícies de contato, devido à elevada temperatura atingida pontualmente. A microsolda então fixa os materiais momentaneamente, sendo removido o material que no momento apresentar menor resistência mecânica. O material desprendido do corpo geralmente fica aderido ao outro, intensificando o desgaste no local de origem e também outros pontos dos corpos envolvidos nesse mecanismo de desgaste. E o desgaste erosivo, tem origem na colisão de partículas sólidas ou gotas de líquidos carregadas por um fluido contra uma superfície, estática ou em movimento (ROCHA, 2000).

### 2.2.1 Desgaste erosivo

A erosão pode ser considerada como um fenômeno puramente mecânico, onde uma determinada região de um corpo sofre uma remoção forçada de material. A perda sucessiva desse material inicia-se a partir da sua superfície, devido ao impacto contínuo de partículas sólidas ou não numa mesma região, num mesmo ponto, ocasionando na região atacada, alterações físicas e por consequente mecânicas (SUNDARRARAJANE e ROY, 1997).

Os tipos de erosão podem ser classificados em: erosão por partículas sólidas em meio gasoso e/ou líquido; erosão por cavitação; somente por ação de líquidos; e erosão-corrosão (TASSI, 2010).

Para auxiliar a compreensão desse mecanismo de desgaste, o recurso de ensaios de desgaste acelerado se faz necessário. Nesse ensaio uma amostra com superfície conhecida e de interesse, é submetida ao esforço de compressão causada por pequenas partículas sólidas e endurecidas dispersas num fluxo gasoso. Esse fluxo proporciona gradativamente

o desgaste do corpo de prova, acelerando assim o efeito erosivo na superfície. As partículas erodentes em movimento, ao se chocarem com a superfície do corpo de prova, transferem energia suficiente para iniciar uma deformação, trinca ou fissura que conseqüentemente colaboram para a remoção do material da região erodida.

Quando um fluxo de partículas atinge a superfície de um material, o desgaste resultante depende de fatores como as condições em que o fluxo incide sobre a superfície do material; e as propriedades do material e das partículas incidentes. Os principais fatores responsáveis pelo processo de erosão podem ser assim distribuídos (FINNIE *apud* MARQUES, 2006).

- I. Operacionais: velocidade da partícula; ângulo de impacto, temperatura, números de partículas por unidades de área e tempo, corrosividade do meio;
- II. Propriedades das partículas: tipo de material, densidade, tamanho, forma e dureza;
- III. Propriedades da superfície: tipo de material; morfologia, nível de tensão, dureza, porosidade, tamanho do grão e rugosidade;

Embora o grande número de variáveis que influenciam no desgaste erosivo resulte num fenômeno complexo e de difícil mensuração, tem-se realizado grandes esforços ao longo dos anos para a formulação de modelos e identificação dos mecanismos de remoção de material, bem como os efeitos das principais variáveis. A norma ASTM G-76 descreve um método padrão para a realização de ensaios de erosão por partículas sólidas usando um gás de arraste. Com este método pode-se classificar quais são os melhores materiais resistentes à erosão em condições específicas de testes, calculando a taxa de desgaste erosivo, ou taxa de erosão volumétrica ( $T_v$ ) desse material a partir da Equação (2.1):

$$T_v = \frac{(m_i - m_f)}{m_e * \rho_{ap}} \quad [\text{cm}^3/\text{g}] \quad (2.1)$$

onde:

$m_i$  = massa inicial da amostra (g)

$m_f$  = massa final da amostra (g)

$m_e$  = massa perdida na erosão (g)

$\rho_{ap}$  = densidade do revestimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 2.2.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas

Durante o desgaste erosivo, as partículas em meio gasoso podem ser embutidas na superfície do substrato alvo, e causar nesse corpo um ganho inicial de massa. A essa fase inicial do processo de erosão do material é denominado de período de incubação. O incessante ataque das partículas erodentes torna a perda de massa linear, sendo esta proporcional à massa das partículas erosivas, bem como ao ângulo e velocidade de impacto. (MAZUR, 2004).

O ângulo de impacto ou ataque ( $\Theta$ ) é definido como o ângulo formado pela superfície do material alvo e a linha de trajetória entre as partículas erodentes. A influência do ângulo de ataque nas taxas de erosão se dá em função da natureza do material alvo. Em materiais dúcteis como metais e ligas metálicas, a máxima taxa de erosão acontece com ângulos entre 15 e 30°. Já para metais frágeis, essa taxa máxima de erosão se dá em ângulos normais (90°), conforme figura 2.2 (SUNDARANJAN *apud* MARQUES, 2006).

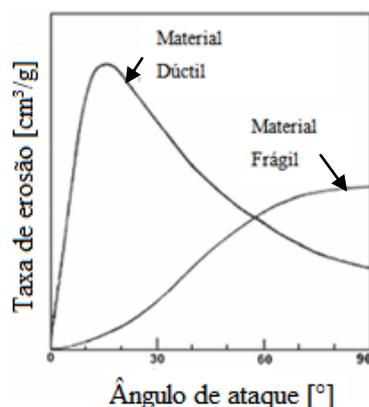


Figura 2.2 Comportamento da taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis. Fonte: Adaptado de Marques (2006)

Em materiais dúcteis, o desgaste erosivo ocorre preferencialmente através da deformação plástica, promovendo o arrancamento de material da superfície. Já os materiais frágeis possuem grande susceptibilidade a trincas e microfissuras, assim o material é removido, a partir de trincas que divergem do ponto de choque da partícula erodente com a superfície. A figura 2.3, mostra esquematicamente as etapas do mecanismo de desgaste erosivo em materiais frágeis. Na posição (1) acontece a fadiga de fase intergranular; (2) início da propagação de microtrincas no contorno dos grãos, (3) nucleação de microtrinca no grão; (4) desprendimento do grão; e por fim (5) fragmentação do grão desprendido (HOOPERT *apud* TASSI, 2010).

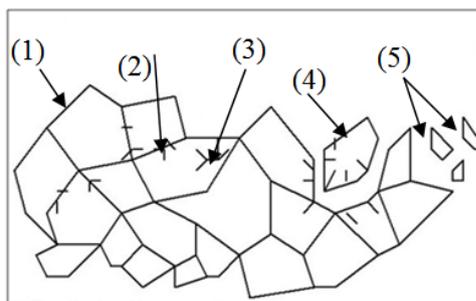


Figura 2.3 Mecanismo de desgaste erosivo em materiais frágeis. Fonte: Adaptado de Marques (2006)

### 2.3 Processos de aspersão térmica

*Thermal Spray* é um termo genérico para uma técnica de deposição de alguns materiais metálicos, com a finalidade de proteção superficial de um elemento de máquina da ação agressiva de mecanismos de desgaste, formando na superfície desse elemento uma camada de revestimento. Em geral as práticas de aspersão térmica realizam uma pulverização dos materiais aplicados nos revestimentos (figura 2.4), às partículas atomizadas são aceleradas e impelidas num jato contra uma superfície preparada. Com o impacto, as partículas são aderidas mecanicamente a superfície do substrato, e a acumulação subsequente das partículas atomizadas produzem uma camada de revestimento com estrutura lamelar (DAVIS-ASM, 2004).

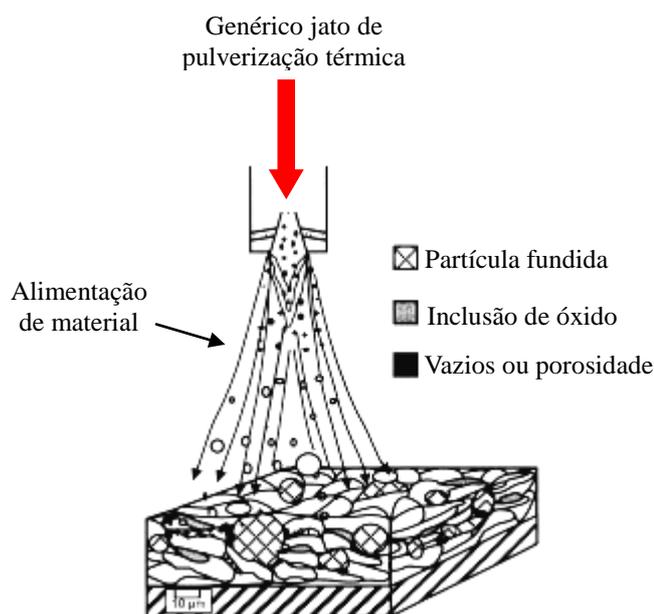


Figura 2.4 Processo de aspersão térmica. Fonte: alterado de DAVIS-ASM (2004)

As partículas, ao se chocarem com o substrato, tornam-se planas e formam finas plaquetas lenticulares, que se conformam e aderem às irregularidades da superfície e umas às outras. A figura 2,5 ilustra, esquematicamente, um revestimento depositado por aspersão térmica. Essa prática de metalização tem sua origem no início do século XX, mais precisamente em 1909, seguida do pedido de patente pelo engenheiro suíço M. U. Schoop (PAWLOWSKI, 2008).

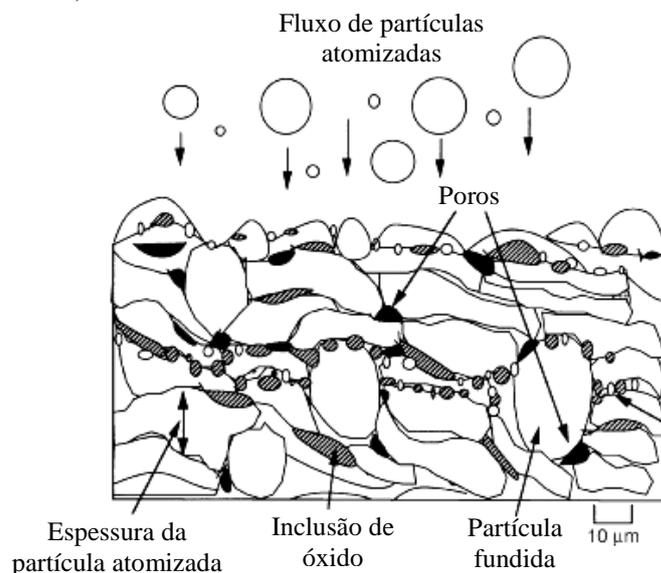


Figura 2.5 Esquema de representação do material aspergido sobre substrato. Fonte: alterado de CRAWMER-ASM (2004)

Uma grande vantagem do processo de aspersão térmica está na ampla variedade de materiais que podem ser usados para produzir revestimentos. Virtualmente, qualquer material que funde sem decomposição pode ser utilizado. Uma segunda vantagem importante é a capacidade de aplicar revestimentos, com baixo aporte de calor no substrato, com isso as propriedades mecânicas da peça (substrato) não são alteradas significativamente. E uma terceira vantagem é a capacidade, na maioria dos casos, de remoção do recobrimento (revestimento) desgastado ou danificado sem alterar propriedades mecânicas, químicas e dimensionais do substrato. (DAVIS-ASM, 2004)

O uso da aspersão térmica tem sua potencialidade comprovada em diversas aplicações, como sistemas de proteção contra a corrosão/oxidação, ligações de base, isolamento térmico e elétrico, biocompatibilidade em implantes biomédicos, aplicações eletrônicas, inserção de propriedades especiais em elementos de máquinas e recuperação dimensional peças metálicas (LIMA, 2003).

As características da técnica impõem às camadas depositadas uma série de heterogeneidades, como: poros, inclusões de óxidos, trincas e falta de aderência. Essa

diversidade de problemas pode ser controlada a níveis aceitáveis, mediante a escolha adequada do processo e parâmetros de aspersão como: corrente elétrica (contínua), pressão do ar, pressão do ar secundário (responsável por evitar que as partículas se aglomerem), tensão e taxa de alimentação dos arames (MARQUES, 2003).

Uma forma de classificar os diversos processos de aspersão térmica é a fonte de calor disponibilizada pelas respectivas pistolas. A tabela 2.2 classifica os processos de aspersão térmica segundo o modo de aquecimento na pistola (LIMA, 2003).

Tabela 2.2 Classificação dos processos de aspersão térmica com relação ao modo de aquecimento. Fonte: LIMA (2003)

Meio de aquecimento	Processos de aspersão térmica
Combustão	<i>Flame Spraying</i> – FS Chama convencional
	<i>High Velocity Oxi-Fuel Spraying</i> – HVOF chama de alta velocidade com material do revestimento em pó
	D-gun – por detonação
Arco elétrico	<i>Arc Spraying</i> – AS arco elétrico
	<i>Plasma Transferred Arc</i> – PTA plasma de arco transferido

### 2.3.1 Aspersão térmica por Arco Elétrico

No processo *Arc Spraying* (figura 2.6), dois eletrodos de arame consumíveis do mesmo material são ligados a uma fonte de corrente contínua (CC) de alta energia. Esses arames são alimentados para uma tocha (pistola) atomização, onde na ponta dessa tocha é estabelecido um arco elétrico entre os arames (eletrodos) iniciando o derretimento instantâneo dos materiais (figura 2.7) (DAVIS-ASM, 2004).

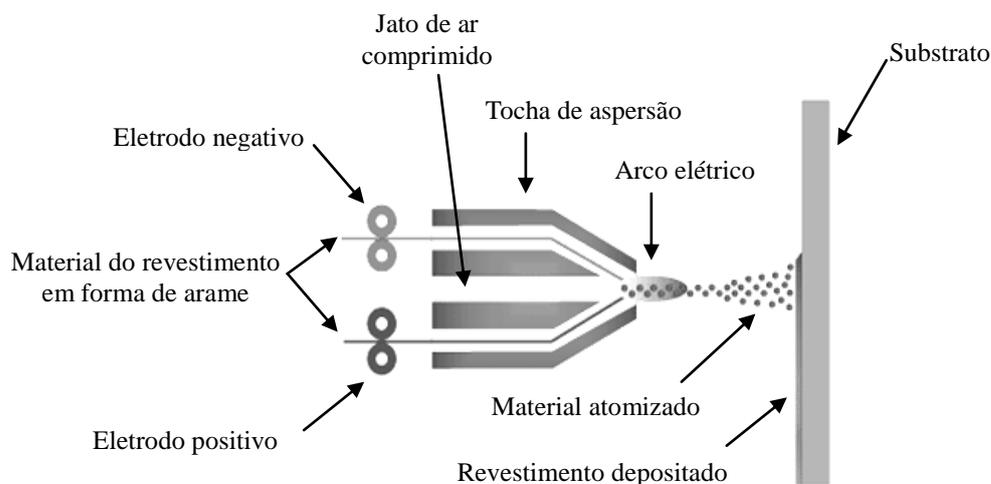


Figura 2.6 Esquema de aspersão térmica por arco elétrico. Fonte: adaptado de LIMA, 2003

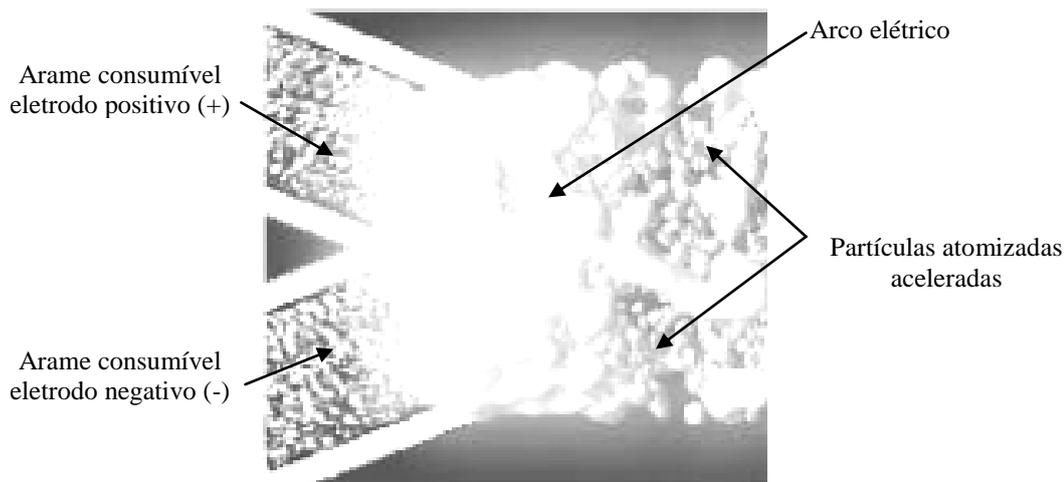


Figura 2.7 Atomização do material consumível dos revestimento em forma de arame.  
Fonte: LIMA, 2003

O metal fundido particulado (atomizado) é expelido para o substrato por meio de uma corrente de ar comprimido devidamente tratado, onde as partículas fundidas e ainda altamente aquecidas tocam a superfície do substrato. O contato das primeiras partículas aspergidas inicia o ancoramento do revestimento, com a superfície do substrato, devido a dissipação de energia no momento dos impactos. Após o ancoramento as partículas subsequentes forma a estrutura lamelar entre passes de metalização (DAVIS-ASM, 2004).

As características e propriedades dos revestimentos estão diretamente ligadas, às energias térmicas e cinéticas envolvidas no processo. Busca-se com a escolha adequada de processo e parâmetros de aspersão, uma boa aderência ao substrato, juntamente com propriedades inerentes a área de aplicação do revestimento, como: dureza; resistência ao desgaste; isolamento térmico/elétrico; condutibilidade; resistência à corrosão e baixa oxidação; entre outras (WILDEN, 2008).

O desenvolvimento deste processo ocorreu pela necessidade de maiores taxas de deposição, do que as oferecidas pelos processos à chama ( $16 \text{ kg/h}$  do *Arc Spraying*, contra  $10 \text{ kg/h}$  do *Flame Spraying*). Esse índice de deposição é atingido, pela maior energia térmica oferecida pelo arco elétrico, onde as temperaturas podem chegar até  $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ , e a velocidades da partícula em torno de  $240 \text{ m/s}$ . O alto grau de potência do arco elétrico pode provocar a decomposição do material aspergido pela oxidação excessiva, e/ou vaporização. (LIMA, 2003).

As altas temperaturas são também responsáveis por uma melhor aderência do revestimento no substrato, atingindo valores até  $70 \text{ MPa}$  para alguns materiais, porém para

metais ferrosos esses valores ficam geralmente entre 28 e 41 MPa. Já no processo *Flame Spraying* estes valores de adesão são reduzidos para 14 a 21 MPa (VICENZE, 2006).

O processo de aspersão térmica é bastante difundido no âmbito da manutenção preditiva a respeito do aumento da confiabilidade operacional do elemento mecânico, apesar das restrições ao fornecimento de material para revestimento em forma de arame, e ao rigoroso e oneroso processo de preparação da superfície de interesse (CRAWMER-ASM, 2004).

#### 2.4 Revestimento de AISI 420 metalizado por *Arc Spraying*

A microestrutura do revestimento AISI 420, assim como os demais materiais são formadas a partir da solidificação das gotículas atomizadas após o impacto desse material, contra a superfície do substrato. O grau de "fusão" na estrutura de revestimento como pode ser observado na figura 2.8, é indicado pela coesão lamelar com baixa incidência de porosidade e trincas. Isso confere uma maior integridade das propriedades mecânicas desse do revestimento (CASTELETT, 2010)

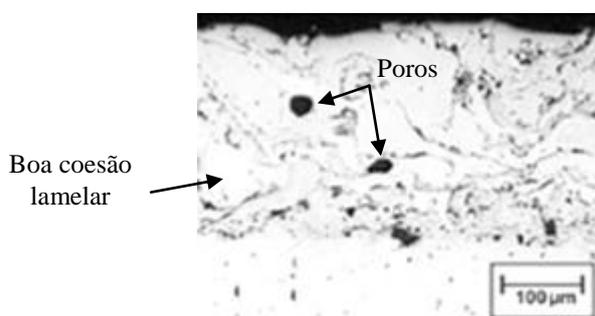


Figura 2.8 Metalização de AISI 420. Fonte: CASTELETT (2010)

Inclusões de óxido em revestimentos metálicos em AISI 420 (figura 2.9) são geralmente identificados como fases escuras, alongadas que aparecem como cordas no revestimento secção transversal, paralela ao substrato. Os óxidos são produzidos por partículas fundidas que interagiram com o gás de atomização, e/ou o aquecimento da superfície de revestimento durante a deposição entre passes de metalização. Nos casos de aquecimento entre passes existe a tendência do aumento da espessura das camadas de óxidos ou nitretos sobre as partículas fundidas, produzindo maiores concentrações de óxido no interior do revestimento. À medida que as partículas se espalham sobre a superfície de impacto, filmes fraturados de óxidos fluem para dentro dessas partículas fundidas, e se

tornam incluídos no depósito, prejudicando o desempenho satisfatório desse tipo de revestimento (CRAWMER-ASM, 2004).

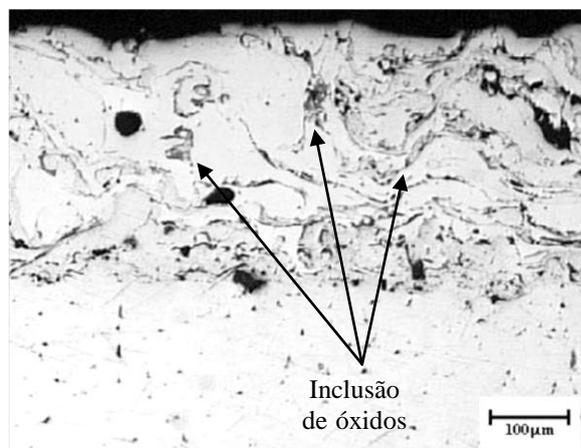


Figura 2.9 Inclusão de óxido em revestimento metálico de AISI 420. Fonte: CRAWMER-ASM (2004).

As inclusões de óxidos aumentam a dureza do revestimento e isto pode gerar revestimentos frágeis, pois óxidos fraturam facilmente. Caso o teor de óxidos seja elevado, pode haver uma dificuldade de coesão entre as camadas depositadas, provocando uma diminuição da força coesiva do revestimento. Desta forma, inclusões de porcentagem elevadas de óxidos são normalmente consideradas prejudiciais às propriedades dos revestimentos, pois diminuem a adesão/coesão e aumentam a porosidade do revestimento. Por outro lado, em algumas aplicações, inclusões de óxidos são desejadas, pois podem aumentar a resistência aos mecanismos de desgaste, a corrosão e diminuição da condutividade térmica (JUNIOR, 2011).

## 2.5 Revestimento a base de Ni-Cr metalizado por *Arc Spraying*

Os revestimentos metálicos à base de Ni-Cr estão entre os materiais com melhor desempenho, quando submetidos à erosão em ângulos de ataque abaixo de 90°. Esta tendência pode ser atribuída a sua microestrutura homogênea das fases (figura 2.10), bem como a microdureza não muito elevada da camada revestida. Além disso, não se pode deixar de destacar que a combinação de Ni e Cr promove a elevada resistência à oxidação e, pelo que se tem de conhecimento da teoria, suportaria até temperaturas da ordem de 1200 °C, porém na prática são usados até temperaturas de 800 °C (VICENZI, 2007).

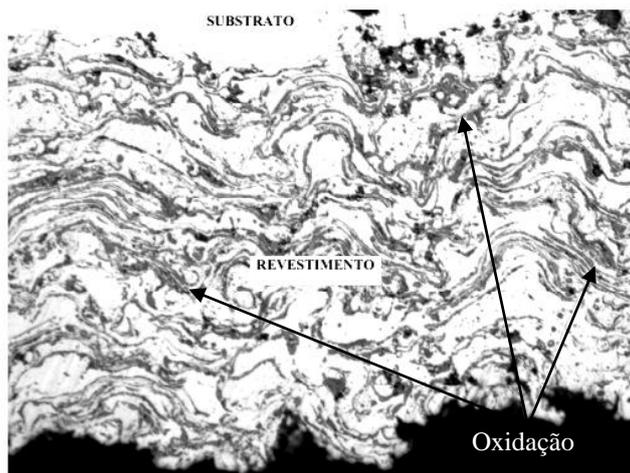


Figura 2.10 Microestrutura típica de revestimento Ni-Cr depositados *por Arc Spraying*.  
Fonte: VICENZI (2007)

Com revestimentos metálicos com porosidades inferiores a 4%, não há grandes diferenças na taxa de erosão, em contrapartida, acima deste valor, pode-se observar que o aumento da porosidade (figura 2.11) tende a incrementar a taxa de desgaste erosivo dos revestimentos. Com essa evidência pode-se supor que a porosidade diminui os pontos de contato entre as lamelas, facilitando o desprendimento do material durante a erosão. Fatores operacionais como: umidade no gás de atomização, parâmetros inadequados de aspersão, e material do revestimento contaminado por oxidação, podem ocasionar a formação de poros e/ou descontinuidades (vazios) na camada revestida (BEZERRA, 2007).

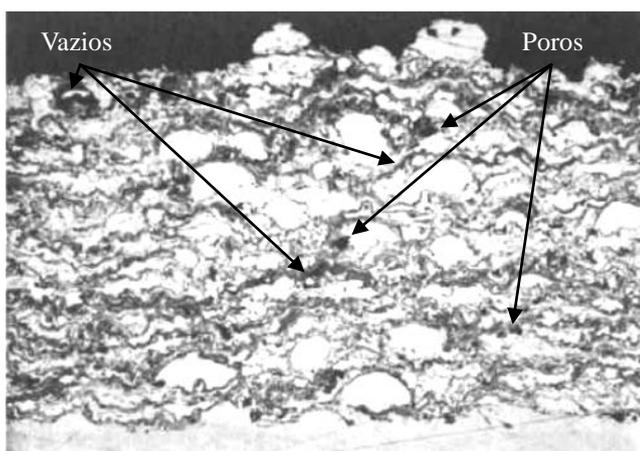


Figura 2.11 Inclusão de porosidade em revestimento Ni-Cr depositados *por Arc Spraying*.  
Fonte: BEZERRA (2007)

## 2.6 Revestimento a base de WC metalizado por *Arc Spraying*

As microestruturas das superfícies a base de WC erodidas por partículas sólidas, em baixo e alto ângulo de ataque (30 e 90°) podem ser observadas na figura 2.12. Em baixo ângulo (30°) é evidente na figura 2.12 (a) e 2.12 (b), que a ação de microcorte nas superfícies erodidas não promoveu um deslocamento por fratura do revestimento. Embora a figura 2.12 (a) ainda mostra a nucleação de microtrinca, e são essas falhas estruturais que fragilizam consideravelmente a microestrutura dessa região. O ensaio erosivo a 90° causou na microestrutura da superfície do revestimento WC aspergido, uma cratera conforme destaque da figura 2.12 (b). A remoção subta de material nesse ponto de análise revela que, a falta de tenacidade dessa microestrutura pode ser o princípio da erosão desse revestimento. Esse entendimento é reforçado pela existência de microtrincas na região dessa cratera (SHI-NING, 2003)

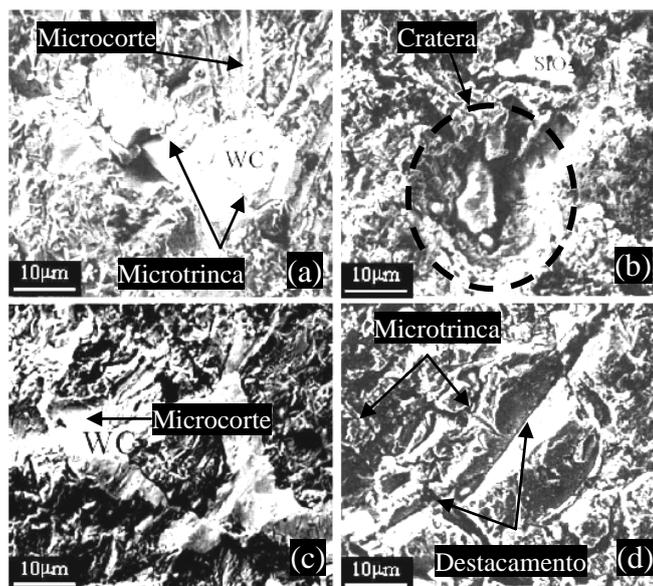


Figura 2.12 Microestrutura da superfície do revestimento a base de WC metalizado por *Arc Spraying*. (a) Ensaio de erosão a 30°. (b) Ensaio de erosão a 90°. (c) Ensaio de erosão a 30°. (d) Ensaio de erosão a 90°. Fonte: SHI-NING (2003)

A inclusão de óxidos e poros na microestrutura dos revestimentos a base de WC, tende a favorecer a fratura e destacamento fragmentado do material, na região do ataque erosivo à 90°. Na figura 2.11 (d) fica pode ser observado a capacidade de transformação plástica do filme de óxido evidenciado pelas microtrincas. Então essa superfície não corresponde a uma boa resistência a ação erosiva de partículas sólidas (SHI-ning, 2003).

## 2.7 Preparação da superfície para aspersão térmica

Para garantir a aderência adequada dos revestimentos ao substrato, deve-se preparar a superfície a fim de permitir que as partículas projetadas no momento do impacto fiquem totalmente aderidas ao substrato (ancoradas), e livres de impurezas residuais. Esta preparação da superfície passa por duas etapas, a primeira é a limpeza seguida da texturização (LIMA, 2003)

O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada, para a obtenção da limpeza e da rugosidade desejada na superfície do substrato. Esta técnica consiste na propulsão de partículas abrasivas na direção do substrato em velocidades relativamente altas. As partículas abrasivas à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) são as mais utilizadas, por serem constituídas de um material de difícil contaminação da superfície de interesse (VICENZI, 2007).

As formas das partículas do abrasivo também têm influência primordial na aderência, isto é, o impacto de partículas com formas angulares acarreta um arrancamento do material da superfície, originando mais irregularidades e pontos de ancoramento, reentrâncias que são favoráveis à aderência do material depositado. Antes da aplicação do revestimento é necessário que a superfície passe pelo processo de texturização, que em geral já é obtida durante a limpeza, pelo jateamento abrasivo. A rugosidade da superfície texturizada deve estar entre 75  $\mu\text{m}$  a 120  $\mu\text{m}$ .

De um modo geral, a rugosidade da superfície mais adequada para a maioria dos revestimentos é apresentada em  $R_a$ , na faixa entre 2,5 e 13  $\mu\text{m}$ . Porém empresas especializadas em metalização por aspersão térmica indicam que, para substratos em aço a rugosidade adequada para uma melhor fixação mecânica do revestimento é de 6 a 7  $\mu\text{m}$  ( $R_a$ ) (LIMA, 2003).

De acordo com o ângulo utilizado pode haver incrustações de resíduos na superfície texturizada. Sendo assim ângulos maiores de jateamento (próximos a 90°) produzem um valor de  $R_a$  elevado, porém as texturas produzidas com o ângulo próximo à 45° tendem a diminuir a contaminação de resíduos. A prática com 45° de inclinação normalmente tem um tempo mais elevado de ataque se comparado ao de 90°, para atingirem o mesmo valor de  $R_a$  (LIMA, 2003)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação dos corpos de prova, para realizar a caracterização da camada metalizada do revestimento aspergido necessita de um rígido controle metodológico para que as condições estipuladas sejam de fato seguidas.

Para realizar esta pesquisa foi necessária a construção de dispositivos, para que o processo de metalização ofereça ao mesmo tempo condição de repetibilidade, agilidade no manuseio do substrato revestido aquecido, e rápido ajuste de alguns parâmetros operacionais, bem como a segurança das pessoas envolvidas no estudo.

Os itens a seguir apresentam os procedimentos metodológicos, e a descrição dos equipamentos utilizados para extrair resultados pertinentes ao estudo como: valor da espessura de camada metalizada, qualificação da adesão do revestimento aspergido, verificação da microestrutura e avaliação do revestimento frente ao ensaio de desgaste erosivo acelerado por partículas sólidas.

#### 3.1 Montagem da bancada de aspersão

Para a deposição de uma camada aspergida com espessura homogênea sobre a superfície do tubo (substrato), os movimentos simultâneos de rotação do tubo e deslocamento linear da pistola de aspersão térmica foram controlados simultaneamente, garantindo com isso a repetibilidade e segurança o operacional. Para isso foi projetada e construída uma bancada experimental para realizar os ensaios de metalização por aspersão térmica.

A base da bancada foi constituída de tubos mecânicos quadrados (40 x 40 mm e espessura de parede 1,5 mm), formando uma estrutura de forma retangular de dimensão compacta (570 x 1200 x 510 mm). Sobre essa base foi fixado um equipamento de funcionamento similar a um torno mecânico, o qual tem a função de girar o tubo durante a metalização dos corpos de provas.

O projeto deste torno consiste num sistema de fixação (figura 3.1) em dois cones, um eixo motriz o qual está ligado ao eixo do motor através de um sistema de transmissão por polias e correias, e outro movido (acoplado a dois rolamentos de contato angular)

chamado de contra ponto. O cone movido tem as seguintes funções: alinhar e permitir a rotação do tubo além de fixar o tubo contra o cone motriz travando o fuso do contra ponto numa posição pré-estabelecida por uma contra porca. Dessa forma um único operador consegue posicionar, fixar e retirar a amostra tubular da bancada com agilidade e segurança.

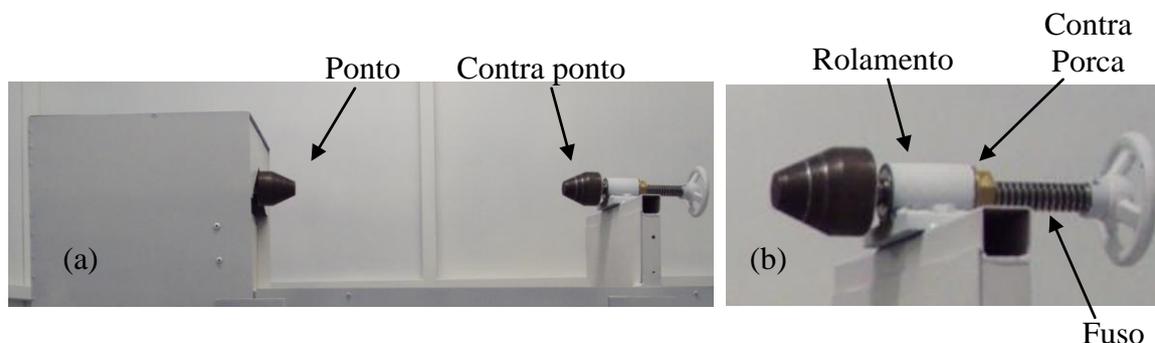


Figura 3.1 Sistema de fixação das amostras tubulares. (a) Identificação dos cones; (b) mostra as peças principais que compõe o contra ponto.

Para controle dos movimentos da bancada experimental, foi necessário montar um painel de controle com inversores de frequência independentes. Um inversor tem a função de variar e fixar o sentido de rotação do tubo, bem como a velocidade de rotação do mesmo. O outro controla a velocidade de avanço longitudinal da tocha.

O deslocamento da tocha possui movimentação para a direita e esquerda. Para isso o motor elétrico do deslocamento da tocha, precisa realizar a inversão do sentido de giro do motor. Essa inversão acontece imediatamente, quando uma das chaves fim de curso de duplo contato, normalmente aberto (NA) e fechado (NF), é acionada pela base de fixação da tocha de aspersão. Esses fins de curso encontram-se fixados por parafuso na mesa de deslocamento da tocha. E são eles os responsáveis por limitar o curso de aspersão longitudinal do tubo.

O sistema de deslocamento linear da tocha possui uma construção simples e robusta, conforme figura 3.2. O seu acionamento é feito por um motor redutor tipo coroa/eixo sem fim, com potência de 0,5 cv e redução de velocidade (1:10). O fuso de rosca trapezoidal possui diâmetro nominal de 25 mm, passo 6 e comprimento de 950 mm, o que permite o deslocamento da tocha em um comprimento útil de 750 mm. Este ainda é biapoiado nas suas extremidades por dois rolamentos tipo base (UCP 204). A porca do fuso é fixa numa base metálica, que está presa nos patins do guia linear por parafusos. Assim, quando o motor é acionado, dependendo do sentido de giro do fuso, a tocha se movimenta lateralmente, tanto da direita para a esquerda ou vice-versa.

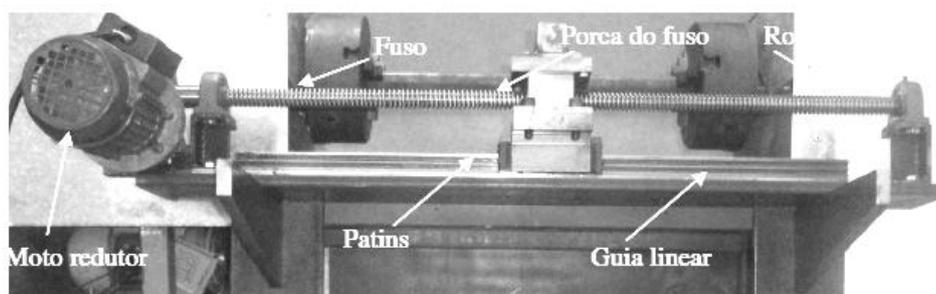


Figura 3.2 Mesa de deslocamento da tocha de aspersão

Para permitir, um deslocamento e o posicionamento transversal da tocha em relação ao tubo, foram desenvolvidas outras duas bases. Uma destinada para nivelar a cabeça de aspersão ao centro do tubo e outra para fixar a distância da tocha ao tubo. A figura 3.3 apresenta as peças que compõe as bases da tocha.

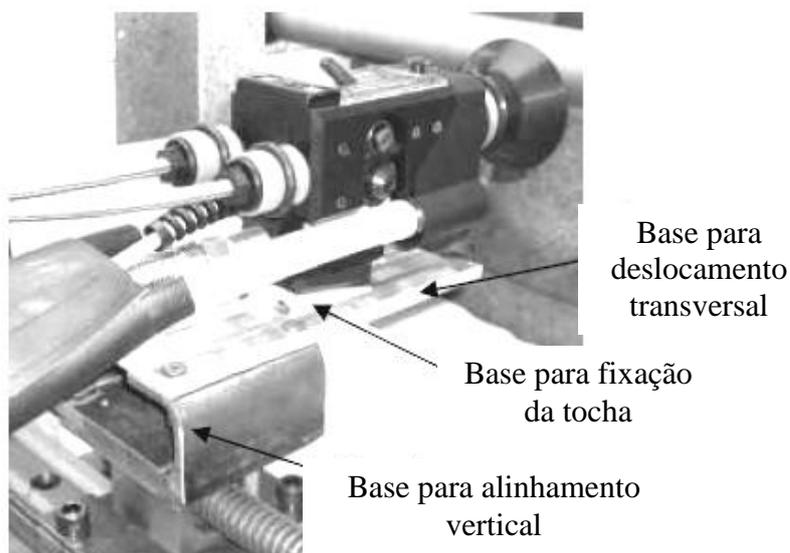


Figura 3.3 Bases para posicionamento e fixação da tocha

Com esse sistema de deslocamento, pode-se encostar o bocal da tocha no tubo (distância mínima), ou afastar esse bocal a 360 mm do tubo (distância máxima). Essa mobilidade transversal se faz necessária, pois o comprimento de pluma da metalização pode influenciar na deposição do revestimento sob o substrato.

Durante o processo de aspersão térmica a arco, alguns gases e fumos são gerados devido à queima do material em forma de arame. Para melhorar a eficiência da exaustão dos gases e fumos e, a segurança das pessoas envolvidas nas operações de aspersão, foi desenvolvida uma cabine com sistema de exaustão forçada (figura 3.4).

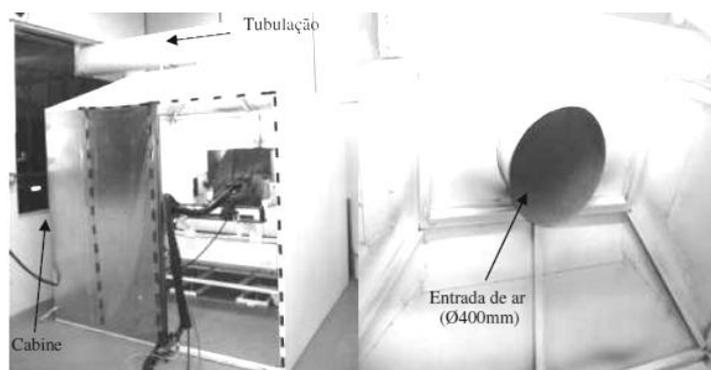


Figura 3.4 Sistema de captação de gases e fumos. (a) Cabine de aspersão, (b) Tubulação de exaustão (aspiração de gás)

O acionamento do ar comprimido e alimentação do arame devem ser realizados a distância e também de fora da cabine de aspersão. Para isso, foi desenvolvido um controle de acionamento remoto. Internamente o controle possui dois botões independentes, quando acionados, esses botões fecham o circuito elétrico liberando o ar comprimido para a tocha, assim como a corrente elétrica de aspersão e alimentação de arame para atomização.

### 3.2 Equipamento de aspersão térmica

O equipamento utilizado no processo de metalização superficial das amostras tubulares e planas, foi o modelo *Eutronic ARC SPRAY 4* da marca *Eutectic Castolin* (figura 3.5).



Figura 3.5 Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico

Industrialmente esse equipamento possui as seguintes características: alta produtividade; baixo custo de aquisição e alta confiabilidade de funcionamento. Assim como os demais equipamentos dedicados para este processo de revestimento, a *Eutronic ARC SPRAY 4* possui configuração, composta por: fonte de tensão, unidade dupla de alimentação de arame (sistema *push-pull*) e uma tocha dedicada para utilização de dois arames.

A tocha é composta por tubos de contato, bocal, conjunto da cápsula de ar e capa anti-*flash*, sistema de tracionamento, além da cabeça de aspersão que fica localizada na parte interna frontal da mesma.

O ar comprimido direcionado pela tocha serve como fonte de propulsão das partículas aspergidas, então o processo de aspersão térmica a arco requer uma alta vazão de ar comprimido (gás de aspersão). O catálogo do equipamento indica uma vazão de 1600  $\text{l}/\text{min}$ . Para tanto foi instalado um compressor de ar do tipo pistão, o qual possui dois cabeçotes de compressão em série configurando as seguintes especificações técnicas: potência do motor 15 cv; rotação nominal do motor 1750 rpm, rotação nominal do compressor 706 rpm, vazão 1700  $\text{l}/\text{min}$  (60 pcm), e pressão máxima de 12 bar (175 psi).

Para atender a norma de metalização da Petrobras N-2568, e o requisito operacional de vazão da rede de ar comprimido (60 pcm), foi instalado no final da rede ar um secador por refrigeração, para garantir a qualidade do gás de atomização quanto a ausência de umidade e particulados sólidos provenientes do processo de compressão do ar atmosférico.

Os sistemas de compressão do ar atmosférico têm como característica a elevação da temperatura do ar e a concentração umidade, promovendo à geração de água dentro do reservatório de compressão a na distribuição do ar comprimido (rede de ar). A linha de ar comprimido então direciona toda a vazão para o trocador de calor do secador de ar, onde o vapor de água é condensado e recolhido no separador, sendo descarregado para fora do equipamento através de uma purga de funcionamento automático. Os secadores por refrigeração reduzem a temperatura do ar para o chamado ponto de orvalho, que é em torno de 2 a 3 °C, garantindo uma eficiência em torno de 99,9% na eliminação de umidade.

### 3.3 Preparação das amostras

Par realizar o estudo de caracterização do revestimento aspergido precisou-se retirar do substrato algumas amostras (tubo) ASTM A-178, e outras foram fabricadas de aço AISI 304 pelo processo de usinagem. As amostras dos tubos serviram para realização do ensaio

de microdureza, microscopia óptica e ensaio de dobramento. Já as amostras do substrato AISI 304 foram destinadas para o ensaio erosivo e também microscopia óptica.

### 3.3.1 Amostra para ensaio de dobramento e metalografia

A norma de metalização N-2568 (Petrobras) determina que para o ensaio de dobramento, o corpo de prova plano deve ter no mínimo 40 mm de revestimento aspergido. E para que uma situação mais real fosse verificada, optou-se em executar o ensaio de dobramento numa amostra retirada do próprio tubo (metal base). Então a Norma N-2568 foi seguida como orientação dimensional dos corpos de prova, para o ensaio de dobramento, conforme figura 3.6 (a).

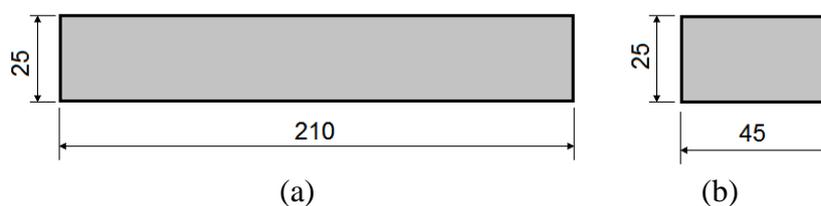


Figura 3.6 Dimensões dos corpos de prova. (a) Corpo de prova para ensaio de dobramento a 180°, (b) Corpo de prova para microscopia e microdureza

Dos tubos também foram retiradas as amostras destinadas para a análise de microdureza e metalografia (figura 3.6 (b)). Porém para evitar um deslocamento indesejável da camada aspergida, foram efetuados nos tubos (substrato) pré-cortes nas dimensões desejadas.

Os pré-cortes (figura 3.7) foram feitos como uma lixadeira manual e um disco de corte de dimensão 101,6 x 1,2 mm, seguindo sempre a linha de corte sem que as arestas do corpo de prova se encontrassem. Dessa forma o corpo de prova permaneceu unido ao tubo, durante o processo de metalização.

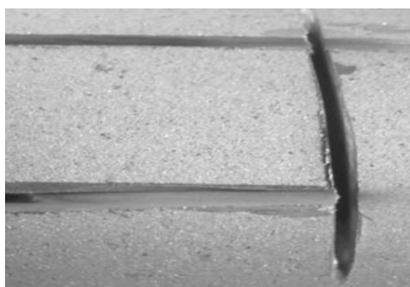


Figura 3.7 Detalhe do pré-corte das amostras

Após esse trabalho, as amostras tubulares foram levadas a cabine de jateamento para texturização das superfícies do substrato, nas áreas de interesse. Na sequência, as superfícies texturizadas foram medidas o índice de rugosidade média ( $R_a$ ), e por fim as amostras tubulares foram fixadas na bancada de aspersão térmica, para receber de forma controlada o revestimento aspergido.

No final da deposição, e com o tubo resfriado os cortes foram realizados, retirando-se as duas tiras retangulares (figura 3.8) para o ensaio de dobramento, e também dois recortes retangulares para micrografia. Em seguida ao corte as amostra foram devidamente identificadas, para o controle técnico metodológico.



Figura 3.8 Amostras aspergidas. (a) Tubo aspergido recortado, (b) Corpos de provas recortados do tubo

### 3.3.2 Amostras para o ensaio de desgaste erosivo

Os corpos de prova que receberam os revestimentos metálicos foram usinados em aço inoxidável AISI 304 (figura 3.9). Com esse tipo de material do substrato pretende-se eliminar a possibilidade de ganho de massa por oxidação do mesmo, pois o ambiente de execução do ensaio é muito aquecido, bem como atender a exigência da norma ASTM G76 para ensaio erosivo por partículas sólidas.

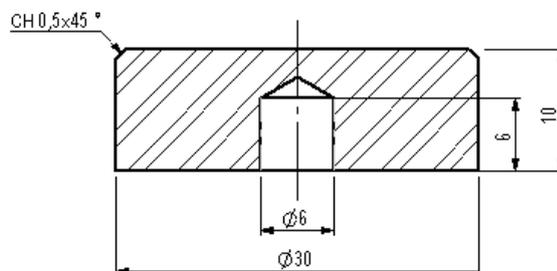


Figura 3.9 Corpo de prova para ensaio erosivo

Essas amostras primeiramente foram identificadas e depois fixadas na parte central dos tubos por parafuso, formando conjuntos de três corpos de prova por revestimento. Uma amostra foi reservada para a análise metalográfica e as outras duas para o ensaio erosivo, para ataque do erodente a 90 e 30°.

Para evitar a deposição de material na lateral das amostras, foram fabricados e instalados anéis de proteção. As amostras receberam os anéis após a texturização e medição da rugosidade da superfície de interesse na metalização. A figura 3.10 apresenta os elementos utilizados para fixar e proteger os corpos de prova planos nos tubos.

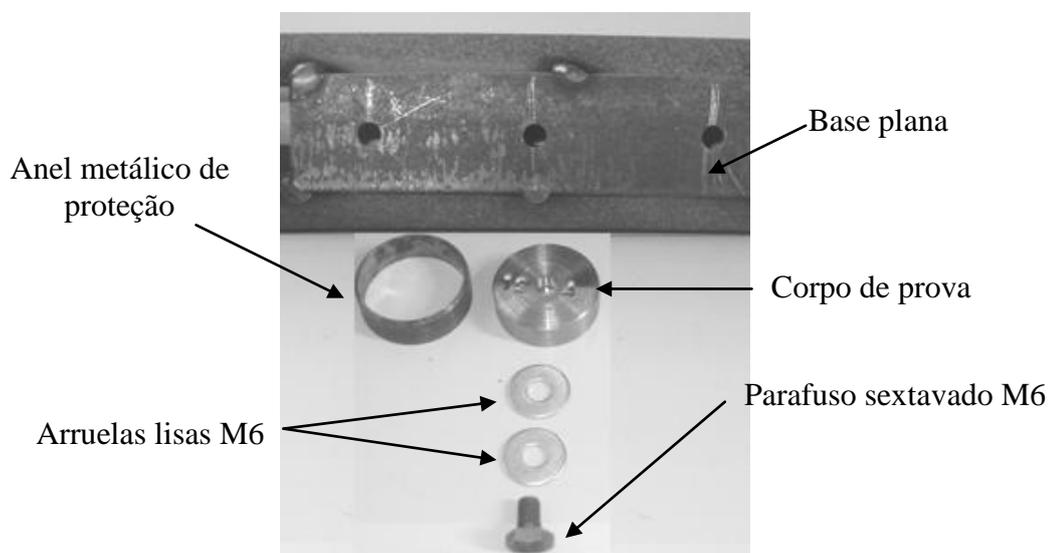


Figura 3.10 Fixação das amostras no tubo

### 3.4 Preparação superficial das amostras

Sobre a superfície da amostra uma erosão foi provocada de forma controlada e homogênea. Neste procedimento as partículas do material erosivo foram projetadas com alta velocidade e entraram em colisão contra a superfície do substrato. O choque mecânico removeu parte do material da área atacada, deixando na superfície de interesse uma pequena saliência ou reentrância, formando assim a texturização do corpo de prova.

Os equipamentos utilizados no procedimento de texturização das amostras foram o jato acelerador de partícula erosiva, e uma cabine fechada para contenção dos erosivos. A figura 3.11 apresenta esses equipamentos.

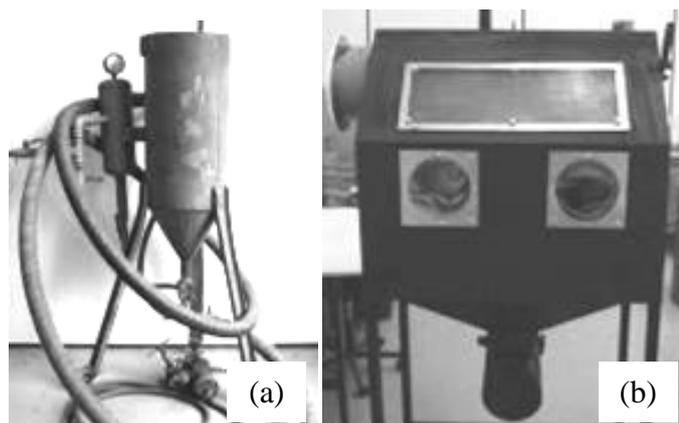


Figura 3.11 Equipamentos para texturização superficial das amostras. (a) Jato acelerador de partículas erosivas (granalhas), (b) Cabine de jateamento

A limpeza e texturização das superfícies do corpo de prova foram realizadas em duas etapas. Na primeira etapa de limpeza do substrato tubular foi utilizado às granalhas esféricas de bauxita 10 mesh de granulométrica, serviço realizado pela empresa Tratebel energia. No LAENS- SATC foi executada o jateamento de óxido de alumínio marrom angular (poligonal) de 24 mesh, para atingir a rugosidade necessária no substrato. Já as superfícies das amostras planas foram limpas e texturizadas somente com o erosivo tipo óxido de alumínio.

Para garantir a homogeneidade da preparação do substrato tubular, foi fabricado um suporte bipartido (figura 3.12) com o objetivo de possibilitar a rotação do tubo durante o processo de jateamento. Nesse suporte pôde-se garantir o ângulo de ataque dos erodentes a  $45^\circ$ , bem como a distância de 100 mm entre o bico do jato e a superfície da amostra.

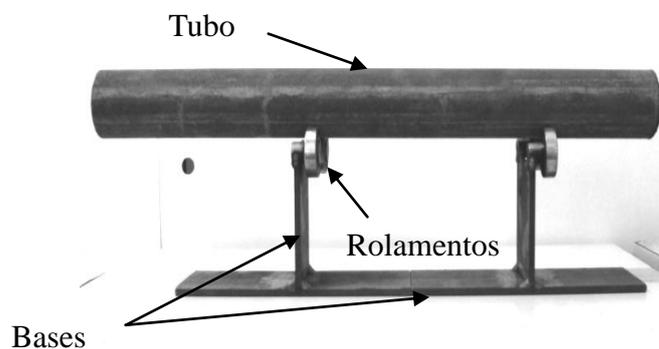


Figura 3.12 Apoio para os tubos

### 3.4.1 Medição da rugosidade

As amostras de superfície jateada reservadas para receber os consumíveis de aspersão térmica de interesse, resistentes ao desgaste erosivo, foram identificadas conforme a tabela 3.1 para controle metodológico.

Tabela 3.1 Identificação das amostras para cada consumível

Identificação das amostras	Consumível	Material base
B	Eutectic 595T	Fe-Cr-B
C	Metco SM 8297	WC-TiC
D	AISI 420	Aço inoxidável martensítico
E	Inconel 625	Ni-Cr

Os parâmetros do processo de jateamento utilizado na preparação superficial das amostras foram configurados conforme a tabela 3.2. Já o tempo de jateamento foi determinado pelo critério de uniformidade de texturização da superfície de interesse, não ultrapassando mais que 40 segundos por  $\text{cm}^2$  na região de ataque.

Tabela 3.2 Parâmetros de jateamento para texturização.

Parâmetros operacionais	Valores ajustados
Pressão de ar	5 bar
Ângulo de ataque	45°
Altura de jateamento	100 mm

A figura 3.13 apresenta a forma como foi executada a medição das rugosidades superficiais.



Figura 3.13 Medição de rugosidade média

Sobre a superfície de interesse, o rugosímetro digital Digimes TR 1100 foi posicionado, e acionado o botão de leitura. Após a leitura da agulha o valor da rugosidade média foi observado no *display* do equipamento. Para as medições foi sempre selecionada o *cut-off* de 1,2 mm.

Os valores da rugosidade de cada amostra foram verificados logo após o processo de jateamento. Essas medições foram anotadas e serviram para verificar se a textura produzida atendia a indicação da norma Petrobras N-2568.

Para evitar o uso de granalhas arredondas foi estipulado um ciclo rápido de utilização das mesmas, utilizando-as somente três vezes. As granalhas desclassificadas foram armazenadas em recipiente fechado, para evitar a contaminação do próprio produto, e do ambiente no qual as mesmas foram estocadas.

Foram tomados cuidados durante a manipulação das amostras após jateamento, para que não houvesse nenhum contato ou contaminação da superfície preparada, evitando assim a desclassificação da texturização e o retrabalho de jateamento.

### 3.5 Metalização dos revestimentos

A deposição metálica de cada revestimento foi executada conforme o fluxograma da figura 3.14 para manter o mesmo procedimento em cada revestimento aplicado.

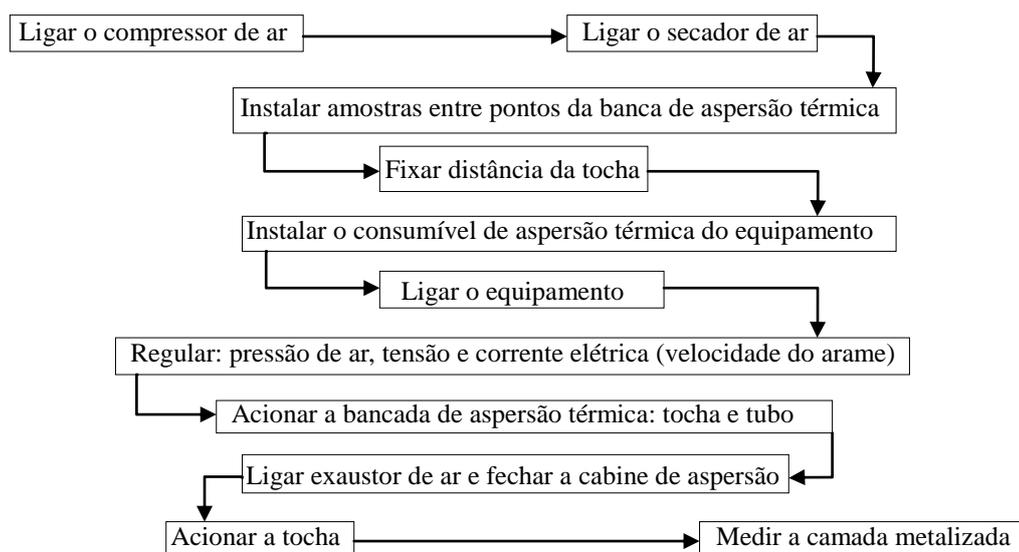


Figura 3.14 Fluxograma do procedimento de metalização das amostras

### 3.5.1 Caracterização dos consumíveis

Com a evolução do processo de metalização por aspersão térmica a arco, alguns fabricantes desenvolveram consumíveis para aplicações industriais específicas com foco na recuperação de peças, e/ou formação de revestimentos.

O objetivo de revestir peças mecânicas está na melhoria de resistência aos mecanismos de desgastes. Então foram adquiridos consumíveis que apresentavam como característica comercial, boa resistência ao desgaste erosivo por partículas sólidas. Os arames requisitados possuem diâmetro nominal de 1,6 mm, e a tabela 3.3 apresenta as composições químicas dos consumíveis selecionados.

Tabela 3.3 Composição química nominal dos consumíveis

Composição Química fornecida pelos fabricantes		
Consumível	Fabricante	Percentual em Peso
Metco 8400	Sulzer Metco	95%Ni, 5% Al
595 T	Eutectic Castolin	À base de FeCrB (composição não divulgada pelo fabricante).
Metco 8297	Sulzer Metco	26% WC, 13% Cr, 6% TiC, 6% Ni, 2% B, 1% Si
AISI 420	Sulzer Metco	13% Cr, 0.5% Ni, 0.5% Mn, 0,35% C, 0,25% Si, 0,06%
Inconel 625	Sulzer Metco	58% Ni, 22% Cr, 8% Mo, 5% Fe, 3.15% Nb, 1% Co, 0.50% Mn, 0.50% Si, 0.40% Al, 0.40% Ti, 0.10% C,

### 3.5.2 Metalização para o ensaio de dobramento

Os parâmetros operacionais de metalização das amostras são: pressão do ar comprimido, sentido de rotação do tubo, rotação da amostra, velocidade de deslocamento da tocha, distância linear entre tocha e tubo, tensão e corrente elétrica além da velocidade do arame. Na tabela 3.4 os parâmetros fixos de metalização podem ser observados.

Tabela 3.4 Parâmetros operacionais fixos da bancada de aspersão térmica

Parâmetros operacionais	Valores ajustados
Sentido de rotação do tubo	Anti-horário
Rotação do tubo	226 rpm
Velocidade de deslocamento da tocha	1074 <sup>mm</sup> / <sub>min</sub>

Para aperfeiçoar a metalização sobre substrato foi estipulado 8 condições de parametrização de aspersão térmica experimental. A tabela 3.5 apresenta as condições operacionais, bem como a ordem de execução da metalização aplicada para cada revestimento. As 8 condições estipuladas foram aplicadas para os 4 tipos de revestimentos

duros selecionados, com isso 32 tubos foram metalizados. Cada tubo continha 2 amostras retangulares para o ensaio de dobramento, com isso a avaliação qualitativa da adesão do revestimento aspergido contou com 64 amostras.

Tabela 3.5 Parâmetros de metalização para metalografia e ensaio de dobramento

Nº da amostra	Ordem de metalização	Pressão (bar)	Tensão (V)	Corrente (A)	Distância da tocha (mm)
1	3 <sup>a</sup>	2,5	26	100	120
2	1 <sup>a</sup>	2,5	26	100	170
3	4 <sup>a</sup>	2,5	28	140	120
4	8 <sup>a</sup>	2,5	28	140	170
5	7 <sup>a</sup>	4,0	26	100	120
6	2 <sup>a</sup>	4,0	26	100	170
7	5 <sup>a</sup>	4,0	28	140	120
8	6 <sup>a</sup>	4,0	28	140	170

A relação entre tensão e corrente elétrica de aspensão térmica, determina a potência de atomização das partículas do revestimento. Então, a potência sintetiza um parâmetro operacional variado na busca de uma melhor deposição, para qualificar a camada aspergida quanto à espessura e adesão ao substrato conforme norma N-2568. Foi considerada como potência baixa a interação de 26 V e 100 A, já para potência alta foi a configurada com 28 V e 140 A.

A cada passe de metalização foi efetuado o controle dimensional da deposição, com um micrômetro externo Mitutoyo de capacidade de medição entre 50 a 75 mm e resolução de 0,01mm. As medições seguiram-se num único ponto controlando dessa forma a espessura da camada de revestimento usado como base de ancoramento (camada base), e a camada do revestimento contra o desgaste erosivo, constituindo assim a espessura total do revestimento depositado.

A tabela 3.6 mostra os parâmetros operacionais de metalização do consumível Metco SM 8400. A metalização base (Ni-Al) foi aplicada com espessura de camada entre 0,01 e 0,15 mm. Já os revestimentos duros receberam uma camada de aproximadamente 0,25 mm, totalizando uma cobertura também aproximadamente de 0,4 mm, sendo efetuados os passes de deposição em sequência, até quando o limite dimensional determinado indicado pela norma N- 2568 fosse atingido.

Tabela 3.6 Parametrização do revestimento base

Parâmetros operacionais	Valores ajustados
Pressão do ar	4 bar
Tensão elétrica	30 V
Corrente elétrica	140 A
Distância da tocha	120 mm

### 3.5.3 Metalização para o ensaio de erosão

Os resultados prévios do ensaio de dobramento, da espessura de camada e principalmente do índice de porosidade das amostras, foram os fatores determinantes para a escolha do melhor parâmetro de aspersão térmica de cada revestimento, dentre todos os parâmetros operacionais testados. A tabela 3.7, mostra os parâmetros que foram configurados no equipamento, para revestir os corpos de prova para o ensaio de erosão acelerada por partículas sólidas.

Tabela 3.7 Parâmetros de metalização para ensaio de erosão

Identificação da Amostra	Tipo de revestimento	Pressão nominal (bar)	Tensão nominal (V)	Corrente nominal (A)	Distância da tocha (mm)
5B	Fe-Cr-B	4,0	26	100	120
7C	WC-TiC	4,0	28	140	120
5D	AISI 420	4,0	26	100	120
5E	Ni-Cr-Mo	4,0	26	100	120

### 3.6 Preparação metalográfica

A amostra destinada para análise metalográfica foi analisada na linha longitudinal do tubo, para tanto precisou-se efetuar o corte dessa amostra nessa orientação. Para efetuar esse corte foi utilizada uma policorte metalográfica com refrigeração, exercendo força de compressão sobre o revestimento aspergido. Com isso buscou-se remover o material na linha do corte sem provocar um deslocamento do revestimento.

A etapa seguinte foi efetuar o embutimento do par de amostras, de cada revestimento aspergido. Esse procedimento tem a finalidade de melhorar o manuseio, da amostra com pequena dimensão. O método aplicado foi o embutimento a frio para evitar a utilização de pressões que poderiam causar o deslocamento da camada aspergida. Os materiais utilizados nesse procedimento foram: resina acrílica com catalisador, uma base com superfície plana (chapa de vidro), tubo de seção circular em PVC (diâmetro de 25

mm), e uma massa de modelar. A cada embutimento as amostras foram identificadas para controle metodológico.

Com as amostras embutidas e fora do tubo plástico, iniciou-se o procedimento de lixamento da superfície para posterior análise. Foram utilizadas lixas d'água de 80 a 1200 grânulos por polegada quadrada, com intuito de minimizar a rugosidade superficial das amostras, assim eliminando as imperfeições causadas pelo corte. O lixamento foi efetuado de forma rotacional em uma lixadeira politriz motorizada de marca arotec, e utilizou-se água corrente para remover as partículas. A tabela 3.8 mostra a ordem de execução do procedimento. Em cada troca de lixa lavou-se as amostras e inverteu-se o sentido de lixamento em 90° para eliminar as ranhuras deixadas pela lixa anterior.

Tabela 3.8 Descrição das sequências de lixamento

Sequência de lixamento	Grânulos por polegada das lixas	Sentido de lixamento
1	80	0°
2	120	90°
3	220	0°
4	320	90°
5	400	0°
6	600	90°
7	1200	0°

O acabamento superficial das superfícies lixadas seguiu com o polimento. Esse processo foi realizado para retirar os últimos arranhões deixados pela lixa 1200, pois a superfície da amostra deve ser totalmente plana, lisa e espelhada para que ocorra a reflexão da luz emitida pelo microscópio ótico. O polimento foi feito utilizando uma lixadeira politriz motorizada destinada somente para o polimento de amostras.

Colocou-se na politriz um pano macio do tipo camurça, e dentro de uma pipeta o abrasivo tipo alumina (1,0 µm) em suspensão e o lubrificante utilizado foi água. A amostra foi rotacionada no sentido contrário da rotação da politriz, para que não ocorresse o chamado rabo de cometa nas inclusões superficiais das amostras. O polimento foi feito e todos os sentidos de maneira circular e com pressão de polimento relativamente baixa, sendo que o tempo necessário foi avaliado de maneira visual, até que todos os riscos do último lixamento fossem eliminados.

Então com a superfície espelhada, lavou-se a amostra e em seguida, com o auxílio de algodão umedecido com álcool e um secador de cabelo, realizou-se a secagem e limpeza da mesma, para que não ocorresse a formação de manchas.

### 3.7 Análise por microscopia óptica

Após a preparação da secção longitudinal da amostra, foram analisados os resultados das condições de aspersão térmica, num microscópio óptico digital Olympus BX51M. Com esse aparelho foi possível observar a adesão do revestimento base no substrato, bem como analisar a formação das lamelas formadas pelo ancoramento das partículas.

Com a lente objetiva seleccionada em 20X, foi efetuada uma varredura na linha do revestimento metalizado para análise geral, sendo digitalizado 5 imagens ao longo da metalização. E para efetuar a medição de camada foi utilizado o *Software Image Tool* (figura 3.15) com isso pode-se estipular a dimensão média da camada aspergida, tanto da metalização de amantegamento, quanto do revestimento contra a erosão.

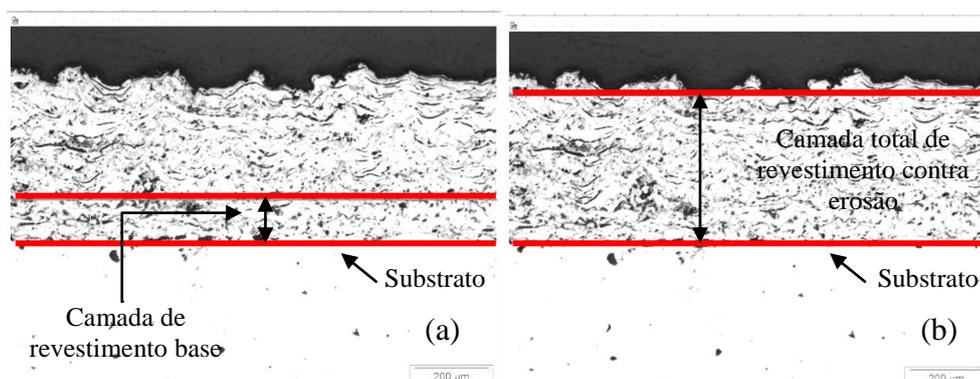


Figura 3.15 *Software Image Tool* para medir a espessura de camada. (a) Altura média da camada base de metalização, (b) Altura média da camada total de revestimento

Através do microscópio Olympus BX51M também pôde ser observado a inclusão de partículas não fundida, a formação de óxidos inerentes do processo de aspersão térmica a arco, e principalmente medir a espessura das camadas metalizadas (base e revestimento), assim como efetuar a análise de porosidade do revestimento na amostra.

Com o uso do mesmo *software* foi empregada a técnica de binarização manual, para obtenção do índice de porosidade na microestrutura aspergida (figura 3.26). Para padronizar o contraste de cores foi adotado o *range* de binarização de 0-30, para todas as amostras.

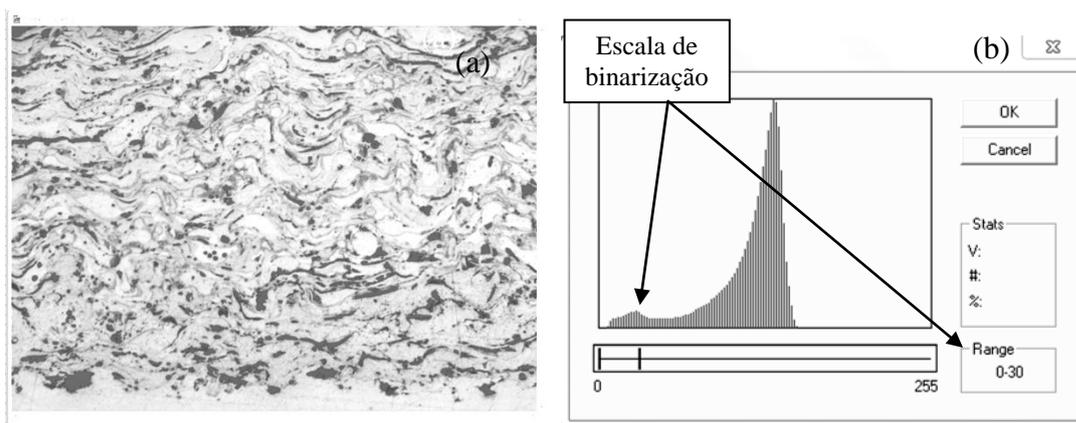


Figura 3.16 *Software Image Tool* para medir o índice de porosidade. (a) Região da camada metalizada, (b) Seleção do *range* para formar o contraste de binarização

Essa técnica associa os defeitos da aspensão térmica dentro de uma área total analisada, realizando o contraste entre branco e preto (figura 3.17), determinando as regiões pretas como sendo a porosidade da microestrutura metalizada. Dessa forma todas as amostras aspergidas foram analisadas. Essa medição é cunho qualitativo, onde os resultados preliminares dessa medição foram utilizados para seleção do melhor parâmetro de aspensão térmica de cada revestimento.

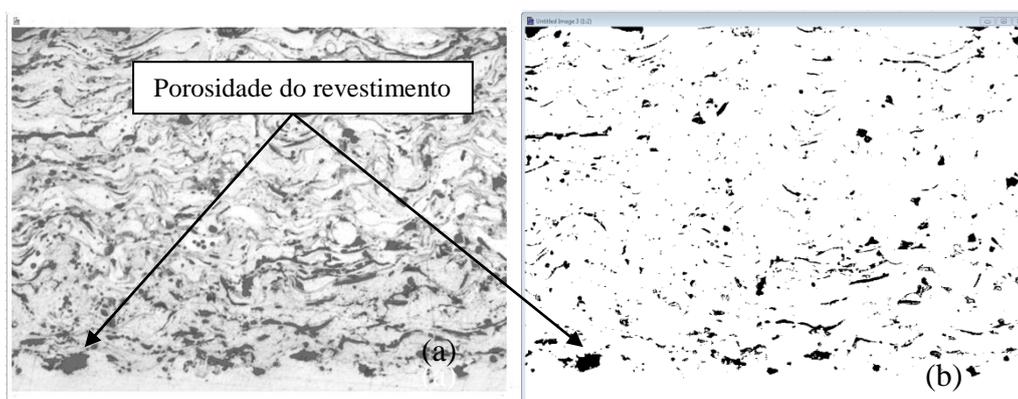


Figura 3.17 Contraste entre poro e lamela metalizada. (a) Contraste entre cinza e vermelho antes da medição (*range* de 0-30). (b) Contraste entre preto e branco

### 3.8 Análise de microdureza

A revisão bibliográfica revelou que a dureza da microestrutura de um revestimento aspergido, tem relação direta com a resistência ao desgaste erosivo. A figura 3.18 mostra a metodologia aplicada para obtenção do perfil de microdureza da microestrutura da

espessura de camada metalizada, e o substrato. O perfil de microdureza do revestimento aspergido foi iniciado no limite da camada revetida, seguindo para o substrato em linha reta sendo 3 identações na camada de revestimento duro, e uma identação na camada base e substrato.

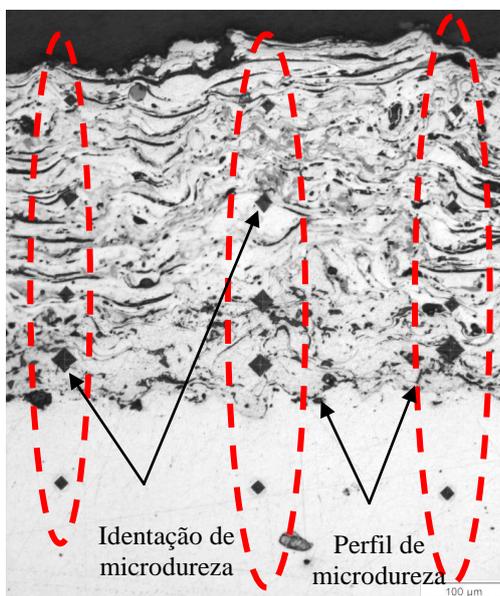


Figura 3.18 Perfil de microdureza

Foi utilizado o Micro durômetro Shimadzu HMV - 2TADW, para caracterizar a camada metalizada. Nesse ensaio foi aplicada uma carga de 980,7 mN (HV 0,1), com tempo de 15 segundos.

Com o microscópio do microdurômetro foi selecionado uma região da amostra metalizada, que fosse possível executar as medições para determinar um perfil dos valores de microdureza. Sobre a face transversal da metalização foram aplicadas em cada amostra 15 identações numa única região, formando 3 linhas de medições entre o revestimento e o substrato.

### 3.9 Ensaio de dobramento

Existem duas técnicas que podem avaliar a qualidade da adesão do revestimento aspergido sobre o substrato. Pode ser efetuado um ensaio de tração, ou um ensaio de dobramento. Nesse estudo foi adotado o método de dobramento, para qualificar a adesão do revestimento ao substrato.

Conforme a norma N-2568 a amostra a ser ensaiada deve ser dobrada à 180°, esse ensaio foi executado num dispositivo (figura 3.19) desenvolvido para atender os requisitos

da norma Petrobras de metalização, o qual foi posicionado numa prensa manual com capacidade de 30 toneladas.

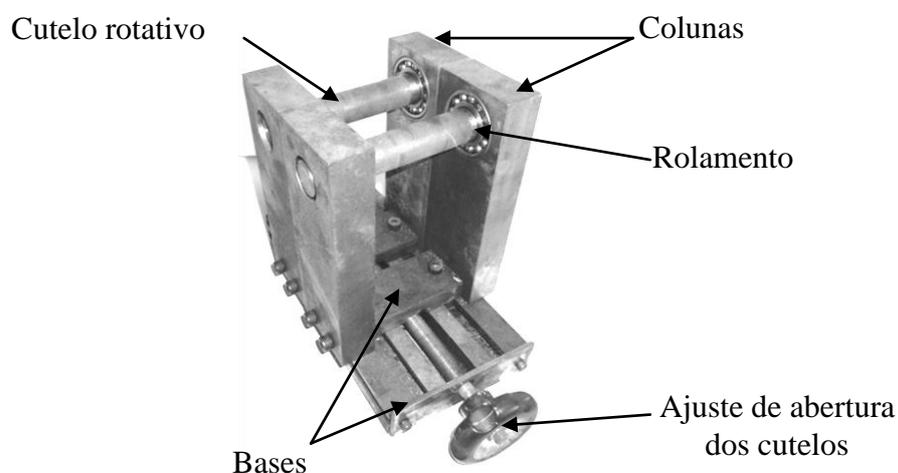


Figura 3.19 Estrutura para ensaio de dobramento

Sobre a base da prensa hidráulica manual, a estrutura de dobra foi centralizada com o eixo do atuador. Os cutelos rotativos foram fixados a 50 mm entre centros. As amostras metalizadas (as tiras) foram posicionadas aos pares, de forma também centralizada sobre os cutelos rotativos da estrutura de dobra. Com a superfície metalizada voltada para baixo, ou seja, o revestimento aspergido em contato com os cutelos (figura 3.20).

Na ponta do atuador foi instalado o cutelo principal (cutelo de carga), onde este foi avançado sobre as tiras efetuando a força para provocar uma deformação à 180° do substrato, formando no centro da amostra uma dobre de raio aproximadamente 8 mm. A figura 3.21 apresenta a amostra após a execução do ensaio de dobramento.

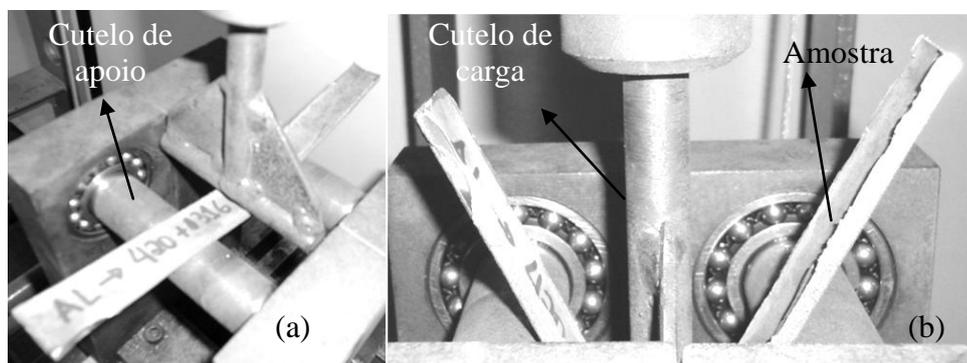


Figura 3.20 Ensaio de dobramento. (a) Posicionamento centralizado da amostra sobre estrutura de dobra, (b) Amostra sendo dobrada



Figura 3.21 Ensaio de dobramento. (a) Perfil da amostra antes da dobra, (b) perfil da amostra dobrada em ângulo de 180°

### 3.10 Ensaio de desgaste erosivo por partículas sólidas

Os ensaios de desgaste erosivo realizados foram realizados com o intuito de avaliar a resistência à erosão dos revestimentos aplicados pelo processo de aspersão a arco, comparando-a com a resistência ao desgaste do material atualmente empregado, simulando as condições operacionais de solicitação que ocorrem no aquecedor tubular.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos - LACER (UFRGS), por possuir o equipamento de desgaste erosivo acelerado por partículas sólidas, homologado segundo a norma ASTM G-76 (figura 3.22). O mesmo permite o ajuste das seguintes variáveis: temperatura do gás de arraste, bem como a sua velocidade, fluxo e ângulo de impacto dos erodentes.

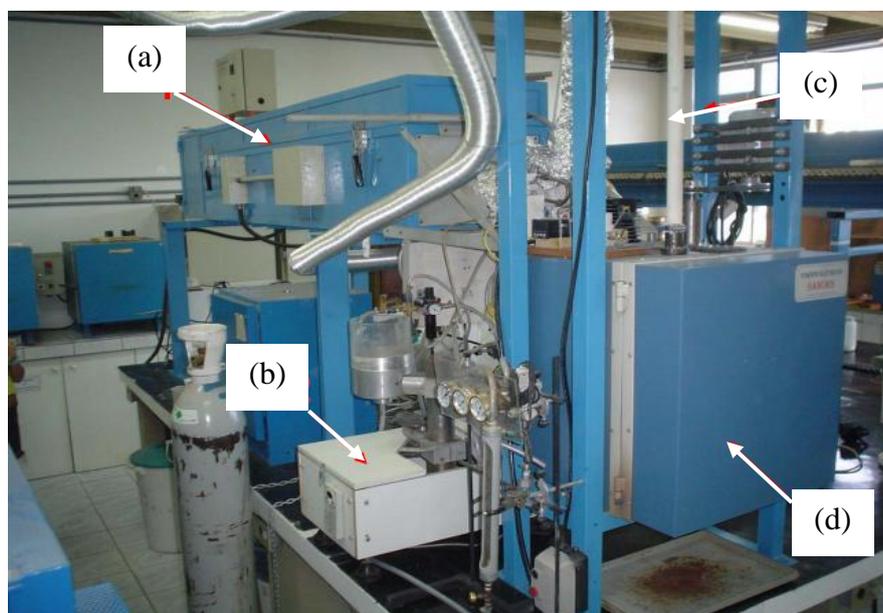


Figura 3.22 Equipamento para ensaio erosivo. (a) Sistema de pré-aquecimento e secagem do gás de arraste, (b) Sistema de alimentação controlada de partículas erosivas, (c) Sistema venturi (acelerador de partículas), (d) câmara de testes com sistema de aquecimento de até 1100°C.

O equipamento de desgaste instalado no LACER é do tipo bico jateador (*jetnozzle*), o qual possui o seguinte princípio de funcionamento: um jato de gás pressurizado (ar, nitrogênio, ou outro gás inerte) é utilizado como meio propulsor das partículas de erodente de alumina eletrofundida marrom. Após saírem de um bocal específico, as partículas atingem uma única área na amostra (alvo).

Em virtude da natureza conhecida dos materiais avaliados optou-se pela realização do ensaio de desgaste erosivo em dois ângulos de ataque (30° e 90°), de forma a identificar os mecanismos predominantes de remoção de material. Os parâmetros do ensaio estão apresentados na tabela 3.10.

Tabela 3.9 Parâmetros utilizados no ensaio de erosão.

Parâmetros operacionais	Valores ajustados
Temperatura	370 °C
Fluxo de massa	8,0 g/min
Velocidade do erodente	30 m/s
Ângulo de impacto	30° e 90°
Tamanho do erodente	160 µm
Acabamento superficial	Lixa #600
Massa de erodente por teste	640 g

O parâmetro temperatura foi determinado conforme regime de operação dos tubos dentro do trocador de calor, para a velocidade do erodente foi estipulado um valor aproximadamente 3 vezes maior, que a velocidade atingida pelas das cinzas leves dentro do trocador de calor. Já o tempo de exposição das amostras foi fixado em 80 minutos, para garantir que somente a camada de revestimento duro fosse exposta no ensaio.

Para realizar as medidas de perda de massa das amostras, foi utilizada uma balança Mettler com precisão de 0,1mg. Previamente às pesagens, as amostras foram submetidas à operação de limpeza ultrasônica por 8 minutos e secagem em estufa a 110 °C por mais 15 minutos. Por fim, utilizou-se a equação 2.1 para a quantificação da taxa de erosão, determinada a partir da perda de volume, considerando a densidade aparente do revestimento.

### 3.11 Estudo do ciclo térmico de aspersão

Foram realizados ensaios de aquisição de ciclos térmicos visando-se a obtenção dados referentes à variação de temperatura do substrato, em diferentes condições de aspersão térmica.

O objeto desse estudo foram dois tubos de ASTM A-178, onde estes foram recortados nas suas regiões centrais, para que os 10 termopares tipo K (cinco para cada tubo) pudessem ser manipulados e fixados na parede interna do tubo, que será submetido ao aquecimento da aspersão térmica. Para a medição dos ciclos térmicos foi empregado um sistema de aquisição de dados HBM Quantum X, e o *Software Catman AP*

Primeiramente foi executada a metalização do consumível AISI 420 sem pré-aquecimento do tubo. A amostra com os termopares foi fixada entre os pontos da bancada de aspersão térmica, com a face de interesse da metalização voltada para a tocha. Foi ajustada a distância entre tocha e tubo, além dos parâmetros de aspersão definidos para o estudo (tabela 3.10) tomando como temperatura inicial a temperatura do ambiente (30 °C).

Tabela 3.10 Parâmetros operacionais de aspersão estudo do ciclo térmico

Parâmetros operacionais	Valores ajustados
Tensão elétrica	30 V
Corrente elétrica	100 A
Distância da tocha	120 mm
Velocidade de deslocamento da tocha	2,3 <sup>m</sup> /min
Pressão de ar	4 bar

Durante o processo de aspersão térmica o tubo permaneceu parado, devido à conexão por cabos dos termopares a sistema de aquisição de dados. E a tocha quando acionada foi movimentada lateralmente metalizando em sequência as camadas lamelares, até o fim do ensaio.

O segundo ensaio seguiu conforme a metodologia operacional da primeira metalização, ou seja, mesma forma de fixação dos termopares nos tubos, mesmo posicionamento da amostra na bancada de aspersão térmica, bem como os mesmos ajustes dos parâmetros operacionais da metalização do AISI 420. O diferencial desse ensaio foi a etapa de pré-aquecimento a 130 °C, onde foi utilizado um maçarico oxigás para que de forma rápida, a temperatura de pré-aquecimento da amostra fosse atingida

Os sinais de tensão elétrica dos termopares foram enviados à placa de aquisição de dados, convertendo esses sinais em informação da temperatura de aspersão térmica na face externa do tubo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta uma discussão dos resultados experimentais obtidos, pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico. Primeiramente, são mostrados resultados preliminares das metalizações desses consumíveis sobre substrato, onde se analisa a qualidade do gás de aspersão térmica, a rugosidade média superficial das amostras, e a adesão dos revestimentos aspergidos sobre o substrato conforme norma Petrobras N-2568. Seguido também da avaliação prévia da espessura de camada aspergida, além do índice de porosidade do revestimento. E em segunda instância, foi avaliado o comportamento metalúrgico dos revestimentos aspergidos frente ao ensaio de desgaste de erosão por partículas sólidas.

### 4.1 Resultados preliminares

Para selecionar os parâmetros operacionais de metalização mais adequados para cada revestimento, alguns testes preliminares foram realizados com o intuito de avaliar o comportamento microestrutural da camada aspergida, bem como verificar a adequação da metalização aos requisitos de qualificação da adesão recomendado por norma.

#### 4.1.1 Parâmetros operacionais de aspersão

Esse estudo mostrou que os parâmetros operacionais são praticamente os mesmos, para os revestimentos selecionados. A tabela 4.1 apresenta os melhores valores ajustados.

Tabela 4.1 Parâmetros operacionais Arc Spraying

Tipo de revestimento	Pressão nominal (bar)	Tensão nominal (V)	Corrente nominal (A)	Distância da tocha (mm)
Fe-Cr-B	4,0	26	100	120
WC-TiC	4,0	28	140	120
AISI 420	4,0	26	100	120
Ni-Cr-Mo	4,0	26	100	120
Ni-Al (base)	4,0	30	140	120

Nos oscilogramas (figura 4.1) pode-se observar a metalização de AISI 420 nos parâmetros elétricos nominais avaliados (26 V/100 A e 28 V/140 A). Com a estabilidade desses parâmetros foi observado uma metalização com menos formação de respingos, e uma pluma de aspersão mais fechada (concentrada). Na figura 4.1(b) nota-se que o aumento das frequências dos curtos-circuitos, se dá com o aumento da velocidade de alimentação dos arames.

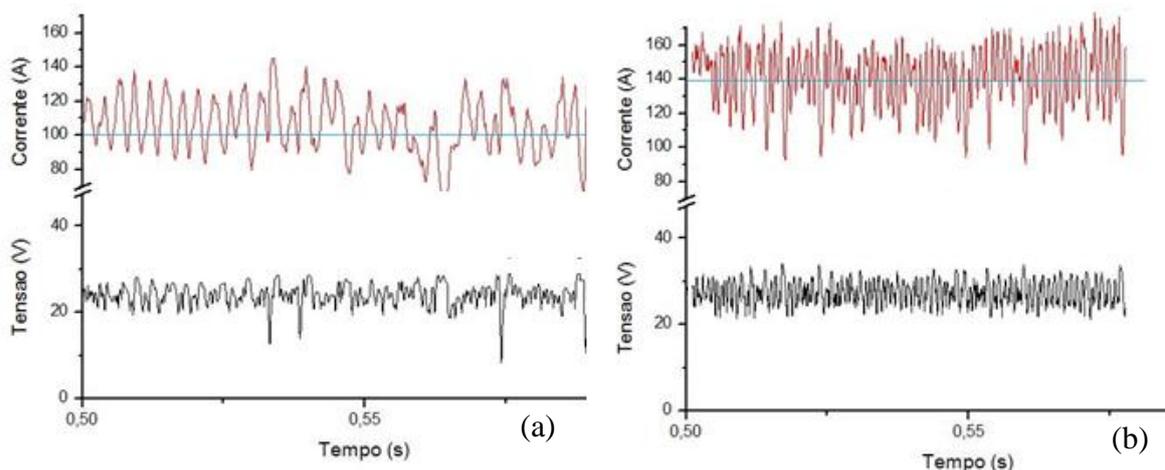


Figura 4.1 Oscilograma para aspersão térmica. (a) 26 V/100 A (b) 28 V/140 A

A atomização das partículas do material do revestimento AISI 420 (figura 4.2) , assim como os demais materiais estudados apresentam forma esférica, nos diferentes parâmetros testados. A análise de microscopia óptica confirmou que aumentando a intensidade de corrente do arco elétrico, ocorre a diminuição das partículas atomizadas. (figura 4.2 (b)). Também pode ser observado que ocorre uma grande variação dimensional do pó metalizado, isso pode ter relação direta com a instabilidade do arco elétrico, mesmo dentro dos valores considerados nesse estudo como ideais.

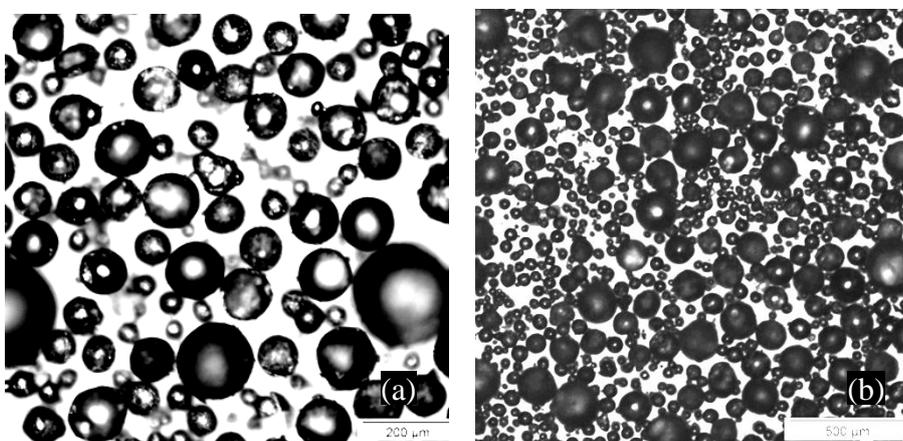


Figura 4.2 Atomização de material AISI 420. (a) 26 V/100 A-200 µm (b) 28 V/140 A-500 µm

Fatores como instabilidade de alimentação da rede elétrica, e o mau funcionamento do mecanismo de tração dos arames podem contribuir com a formação de arcos elétricos mais instáveis, e com isso maior incidência de respingos e partículas não fundidas.

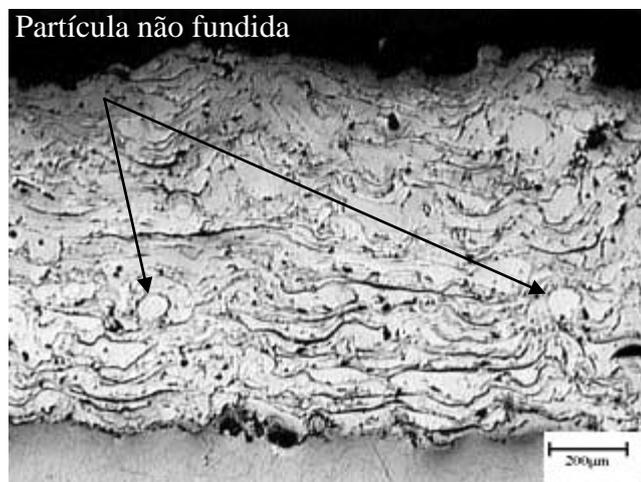


Figura 4.3 Partículas não fundidas em revestimento AISI 420 aspergido

#### 4.1.2 Gás de atomização

Tanto o ar comprimido utilizado na atomização das partículas, quanto para o jateamento do substrato deve atender os requisitos de qualidade do ar da norma N-2568. Este norma recomenda a observação de qualquer tipo de molhamento e/ou manchamento, indicadores da contaminação no fluxo de ar, quando esse fluxo for aplicado sobre a superfície de um papel branco absorvente, conforme pode ser observado na figura 4.4.

O resultado esperado com a utilização do secador de ar foi atendido pela norma N-2568, pois não foi observado no papel branco nenhum indício de contaminação do gás de atomização no papel absorvente. Na figura 4.4 (b) pode-se observar que não foi encontrado nenhum tipo contaminante do ar comprimido sobre a folha.

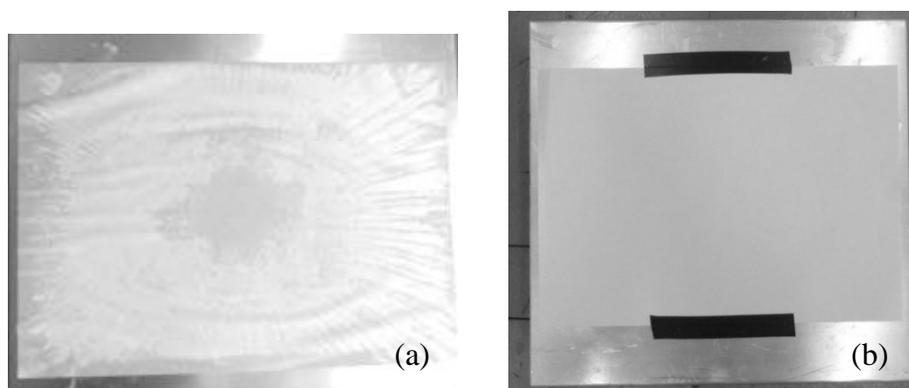


Figura 4.4 Fluxo de gás para atomização aplicado sobre papel absorvente. (a) Presença de unidade no gás de atomização, (b) Gás de atomização livre de contaminantes

Com o objetivo de visualização prévia da microestrutura do revestimento aspergido (figura 4.5), para avaliar a eficiência do secador de ar, foi efetuada uma metalização preliminar com o revestimento AISI 420 (Metcoloy 2<sup>®</sup>). O aço inoxidável foi aspergido com os mesmos parâmetros operacionais sobre duas amostras tubulares, nas condições: com secador de ar comprimido mostrado na figura 4.5 (a), e sem secador de gás para atomização mostrado na figura 4.5 (b).

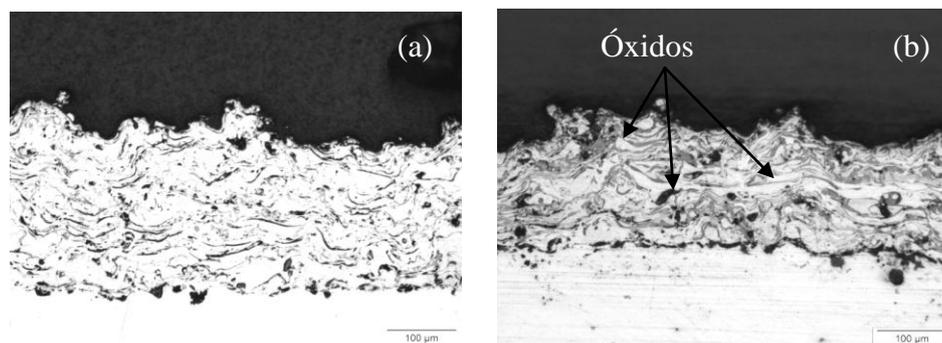


Figura 4.5 Micrografia de revestimento AISI 420. (a) Microestrutura aspergida com gás de atomização sem umidade, (b) Microestrutura aspergida com umidade contida no gás de atomização.

Verificou-se nesse teste que a presença do secador de gases, se traduz na redução da quantidade de óxidos entre as lamelas metalizadas, em comparação ao revestimento depositado sem o secador de gases, confirmando a necessidade de utilização do secador de ar no processo de aspersão térmica a arco dos revestimentos duros.

#### 4.1.3 Rugosidade superficial do substrato

Para avaliar a eficiência do processo de preparação superficial dos corpos de prova, no ancoramento da metalização sobre o substrato, foram obtidas imagens por microscopia óptica de duas amostras preparadas superficialmente pelos dois tipos de granalhas. Dessa forma também foi possível avaliar a eficiência do tipo de erodente.

Na figura 4.6 (a) pode ser observado o perfil do substrato preparado com granalha de bauxita. Já na figura 4.6 (b) é visualizada a amostra preparada superficialmente com óxido de alumínio marrom, sendo essa superfície, a mais adequada conforme indicação da norma N-2568 (Petrobras), por apresentar maior rugosidade média ( $R_a$ ) e perfil erodido com arestas mais angulares.

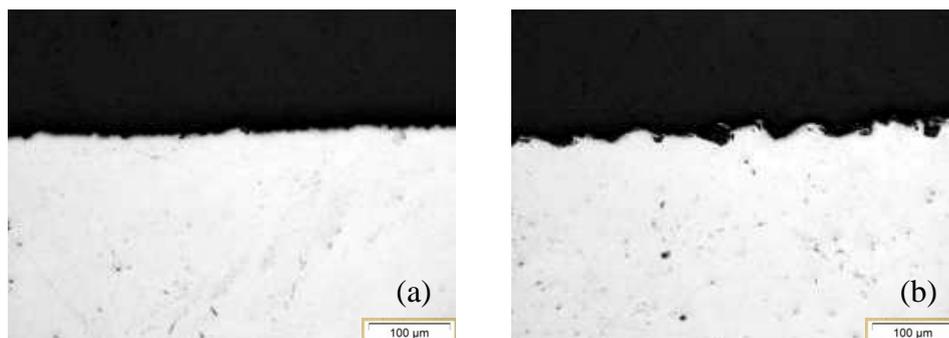


Figura 4.6 Rugosidade superficial das amostras. (a) Superfície preparada com granalha de bauxita ( $R_a = 4,07 \mu\text{m}$ ), (b) Superfície preparada com granalha em óxido de alumínio marrom ( $R_a = 7,37 \mu\text{m}$ )

Os efeitos da rugosidade superficial do substrato, sobre o ancoramento do revestimento podem ser observados na microscopia óptica da figura 4.7. A superfície preparada com óxido de alumínio (figura 4.7 (b)) é a de maior rugosidade média, evidenciando que esta superfície obteve o melhor ancoramento das partículas aspergidas. Com isso ocorre uma maior adesão do revestimento ao substrato, e quanto mais uniforme for o contato entre faces metálicas (aspersão e substrato), melhor será o desempenho do revestimento frente ao critério de adesão do revestimento no ensaio de dobramento a  $180^\circ$  indicado pela norma N-2568.

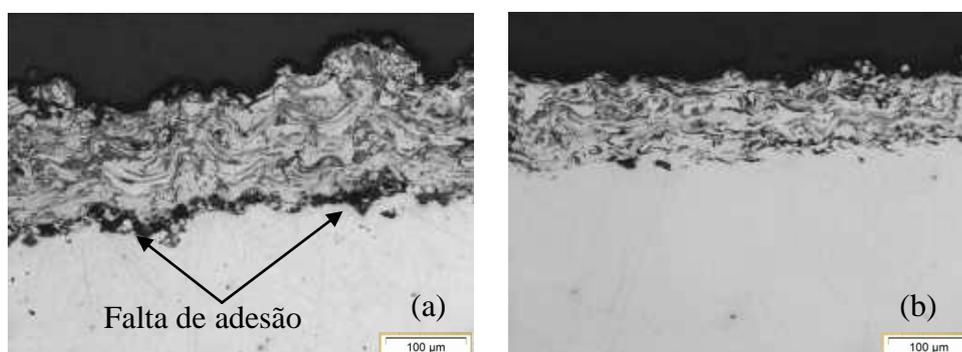


Figura 4.7 Adesão de metalização ao substrato. (a) Metalização de AISI 420 sobre superfície preparada com granalha de bauxita ( $R_a = 4,07 \mu\text{m}$ ), (b) Metalização de AISI 420 sobre superfície preparada com granalha em óxido de alumínio marrom ( $R_a = 7,37 \mu\text{m}$ )

A tabela 4.2 sintetiza os resultados das medições da rugosidade média dos corpos de provas superficialmente preparados, para receber as metalizações destinadas ao ensaio de desgaste erosivo (ASTM G-76). As amostras de numeração 1 de cada revestimento foram reservadas para a metalografia da camada aspergida, já as amostras de número 2 e 3 foram expostas ao ensaio de erosão. Sendo a amostras número 2 utilizadas no impacto dos erodentes a  $90^\circ$ , e as amostras de número 3 para erosão em baixo ângulo de ataque ( $30^\circ$ ).

Tabela 4.2 Rugosidade das amostras para ensaio ASTM G-76

Consumível	Amostras	Rugosidade Média $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )
Eutectic 595T	1B	7,08	$\pm 0,66$
	2B	6,90	$\pm 0,59$
	3B	6,86	$\pm 1,41$
Metco SM 8297	1C	6,95	$\pm 0,80$
	2C	7,42	$\pm 1,02$
	3C	7,35	$\pm 1,88$
AISI 420	1D	7,01	$\pm 0,46$
	2D	6,76	$\pm 0,69$
	3D	6,72	$\pm 0,68$
Inconel 625	1E	7,68	$\pm 0,85$
	2E	7,93	$\pm 0,61$
	3E	7,05	$\pm 1,35$

Os valores de  $R_a$  obtidos confirmam que todas as superfícies jateadas, enquadram-se dentro da norma de metalização Petrobras N-2568, por apresentarem valores entre 6 e 7  $\mu\text{m}$  de rugosidade média.

#### 4.1.4 Ciclo térmico em aspersão térmica a arco

Outro fator importante sobre a adesão do revestimento ao substrato são os ciclos térmicos, ocorridos durante o processo de deposição dos revestimentos.

O estudo do ciclo térmico de aspersão revelou que ocorre um rápido acréscimo de temperatura na superfície do substrato, a cada passe de metalização (figura 4.8), até que o conjunto metálico (revestimento e substrato) entre em equilíbrio térmico, quando é iniciada a metalização a partir da temperatura ambiente da cabine de aspersão. Essa estabilização térmica ocorre aproximadamente à 100 °C para os parâmetros utilizados.

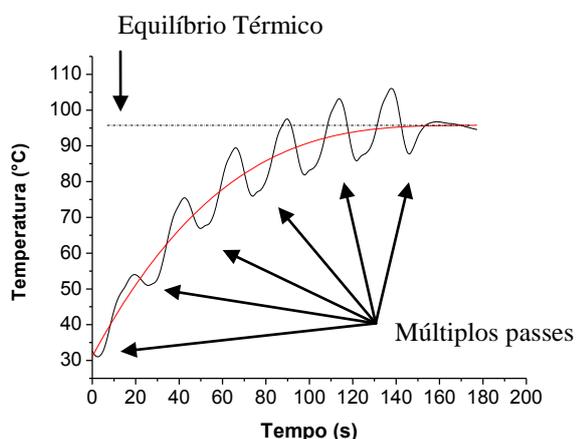


Figura 4.8 Ciclo térmico do substrato sem pré-aquecimento

Em função dos diferentes coeficientes de dilatação térmica, ocorrem tensões residuais contrárias à adesão na interface entre o substrato e o revestimento. Essas tensões eventualmente podem ser reduzidas, e distribuídas quando o substrato for pré-aquecido. As temperaturas de pré-aquecimento recomendadas para a maioria dos revestimentos estão na faixa de 90 °C até 150 °C, por serem capazes de promover uma eliminação mais efetiva de quaisquer tipos de contaminantes voláteis existentes no substrato. (LIMA, 2003)

A partir desse estudo pode-se observar no gráfico da figura 4.9, que a temperatura de pré-aquecimento não é mantida durante o processo de aspersão térmica, ficando evidenciado que a cada passe de aspersão do revestimento AISI 420, a temperatura do substrato foi atenuando para 100 °C, estabilizando-se nesta temperatura.

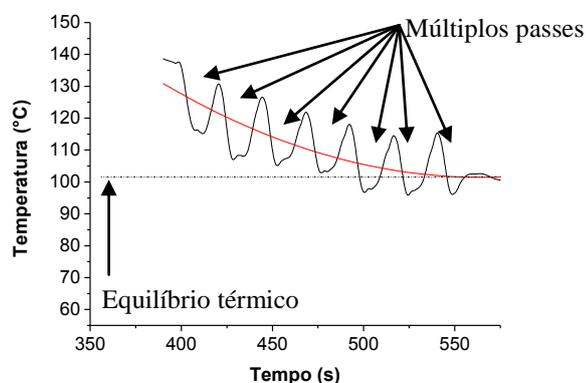


Figura 4.9 Ciclo térmico do substrato com pré-aquecimento

As variáveis elétricas do processo de aspersão a arco, as quais definem a potência do arco elétrico, podem influenciar significativamente a distribuição de temperaturas durante o processo de aspersão térmica a arco. A figura 4.10 apresenta a comparação de ciclos térmicos para metalização com diferentes potências do arco elétrico.

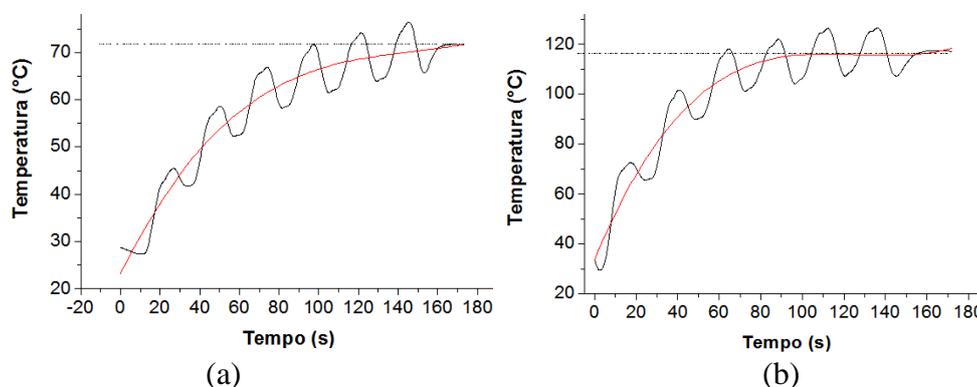


Figura 4.10 Influência da potência elétrica do arco elétrico sobre a temperatura do substrato. (a) Aspersão térmica com baixa potência (1,9kW), (b) Aspersão térmica com alta potência (5,1kW),

A negligência no cuidado com a elevação da temperatura do conjunto (revestimento /substrato) resultará na redução da característica de adesão do revestimento ao substrato, em virtude da natureza distinta entre os materiais utilizados (diferença entre coeficientes de dilatação térmica), promovendo o deslocamento do revestimento no momento da aspersão térmica, conforme pode ser observado na figura 4.11.

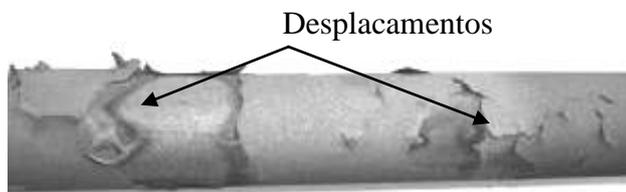


Figura 4.11 Deslocamento do revestimento por alta potência do arco elétrico

Com esse estudo preliminar pode-se determinar que as causas mais prováveis para a ocorrência do deslocamento devido à elevação da temperatura do conjunto aspergido são:

1. uma metalização com alta potência do arco elétrico,
2. baixas velocidades de deslocamento da tocha e baixa rotação do tubo,
3. excesso de pré-aquecimento,
4. distância muito próxima entre tocha e tubo.

#### 4.1.5 Ensaio de dobramento

Uma vez que a fixação dos tubos no trocador de calor é feita pelo processo de deformação a frio (flangeamento por expansão dimensional), foram realizados os ensaios de dobramento em todas as amostras conforme metodologia, afim de verificar a qualidade e comportamento do revestimento aspergido frente a uma deformação mecânica.

A figura 4.12 estabelece um comparativo entre revestimentos de aço inoxidável AISI 420 metalizados, nas condições: sem e com deposição de camada base.

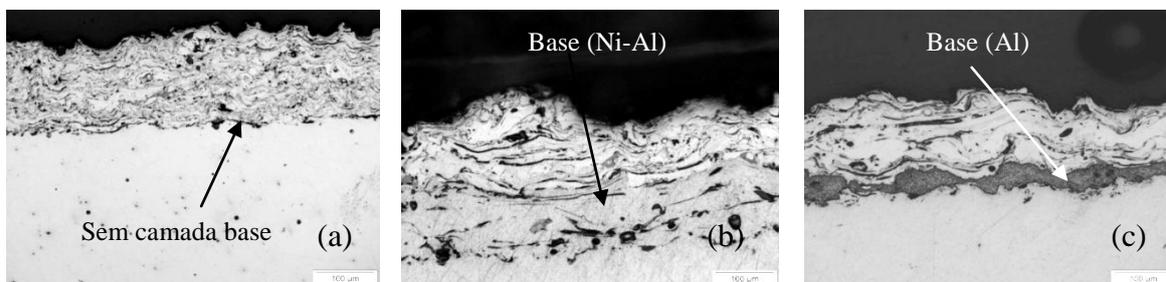


Figura 4.12 Metalização sobre camada base. (a) Metalização AISI 420 sem camada base, (b) Metalização AISI 420 com camada base (Ni-Al), (c) Metalização AISI 420 com camada base (Al)

Verificou-se que os melhores comportamentos, frente às deformações dos corpos de prova foram às amostras que possuem uma camada de deposição prévia de Ni-Al (figura 4.13-a). Também ficou evidenciado, que o alumínio possibilitou a manutenção da ductilidade da camada revestida (AISI 420), de forma similar à liga de níquel (Ni-Al) durante o ensaio de dobramento a 180°.

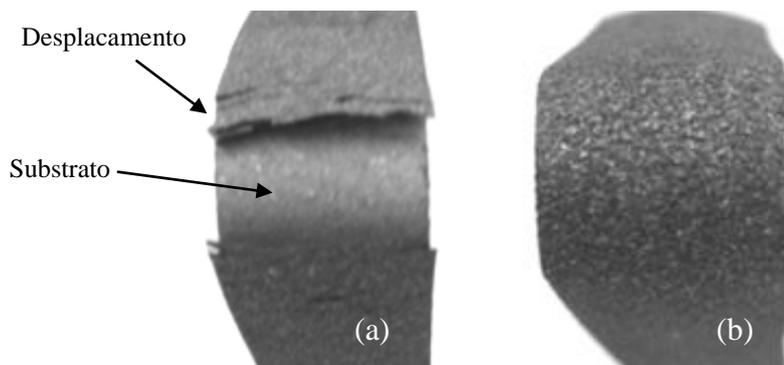


Figura 4.13 Teste de dobramento. (a) Revestimento AISI 420 sem camada base, (b) Revestimento AISI 420 com camada base em Ni-Al.

Todavia a deposição do revestimento AISI 420 sobre uma camada de Ni-Al apresentou visualmente menor formação de trincas na região da dobra (figura 4.10-a), classificando esse revestimento base, como o ideal para receber as deposições dos revestimentos duros, selecionados para o ensaio de desgaste erosivo.

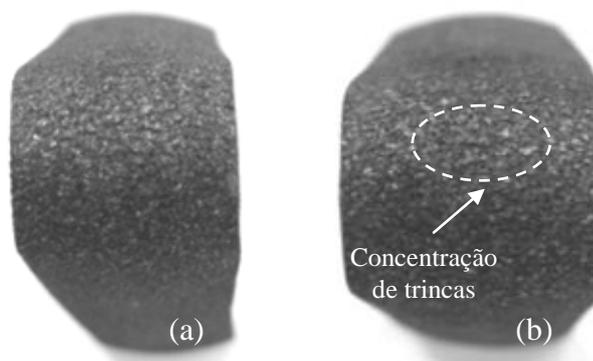


Figura 4.14 Característica superficial do revestimento após ensaio de dobramento. (a) AISI 420 + Ni-Al, (b) AISI 420 + Al

A figura 4.15 apresenta três amostras revestidas com aço inoxidável AISI 420 sob os mesmos parâmetros de aspersão, metalizadas sobre uma camada base em Ni-Al, porém com espessuras de camada diferentes, devido a maior quantidade de passes. Verificou-se que a resistência ao dobramento diminui com o aumento da espessura da camada metalizada, mesmo com a deposição prévia de Ni-Al. A figura 4.15 (b) evidencia o

surgimento de pequenas trincas na amostra com espessura de 0,6 mm, enquanto que a figura 4.15 (c) apresenta o completo deslocamento do revestimento para espessura de camada acima de 1,0 mm.

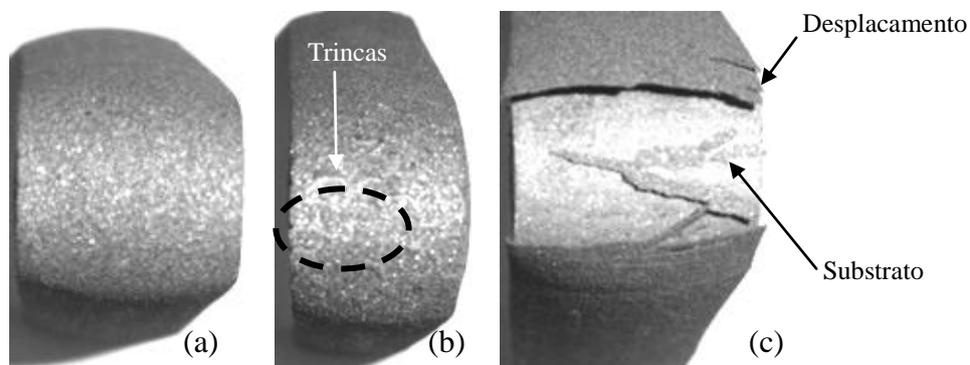


Figura 4.15 Ensaio de dobramento com diferentes espessuras de camada metalizadas. (a) AISI 420 (espessura de camada total 0,4 mm), (b) AISI 420 (espessura de camada total 0,6 mm), (c) AISI 420 (espessura de camada total 1,0 mm)

A utilização da camada de Ni-Al promoveu a obtenção de uma adesão satisfatória, frente aos ensaios de dobramento, classificando o revestimento com 0,4 mm de espessura (figura 4.15 (a)) como ideal, conforme norma de metalização N-2568 (tabela 4.3). Essa norma determina que após o ensaio de dobramento, o revestimento aspergido sobre o corpo-de-prova não pode ter indícios de trincamento grosseiro, e/ou deslocamento do revestimento. As amostras que apresentarem trincas finas e curtas, na região do dobramento serão classificadas como ideal pelo critério de avaliação visual.

Tabela 4.3 Critério para avaliação a resistência da adesão do revestimento aspergido

Critério	Avaliação visual (macro)
Ideal	
Marginal	
Rejeitada	

A figura 4.16 apresenta os melhores resultados do ensaio de dobramento, entre os parâmetros operacionais testados, que pela norma N-2568 foram classificados como ideais. Pode-se observar nessas imagens, que existem poucas incidências de trincas aparentes na região dobrada. O revestimento AISI 420 (figura 4.16 (b)) é o material de melhor adesão. O surgimento dessas trincas pode ser explicado, pelas características microestruturais de alta dureza e baixa resistência mecânica dos revestimentos aspergidos. Além da baixa tenacidade dos revestimentos, e a existência de descontinuidades entre as lamelas de metalização (poros), também são fatores preponderantes na fratura do revestimento.

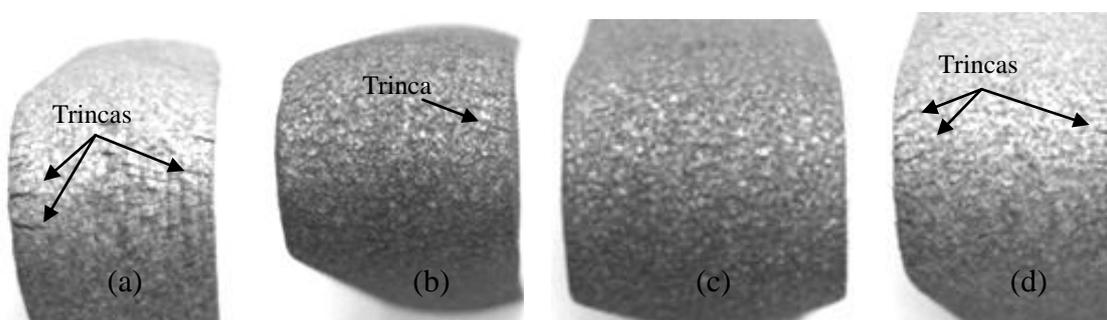


Figura 4.16 Ensaio de dobramento com os melhores resultados. (a) Revestimento do consumível Eutectic 595T, (b) Revestimento do consumível Metco SM 8297, (c) Revestimento do consumível AISI 420, (d) Revestimento do consumível Inconel 625

#### 4.1.6 Análise microestrutural

Para confirmar o desempenho dos revestimentos aspergidos, frente ao teste de dobramento foi determinado o índice de porosidade de cada parâmetro operacional metalizado. A figura 4.17 apresenta as diferenças de porosidade entre os consumíveis aspergidos. A figura 4.17 (b) evidencia que o revestimento de maior porosidade é o WC-TiC (consumível - Metco SM 8297). SHI-NING (2003) sugere, que o alto índice de porosidade em um revestimento a base de WC aspergido traduz a incompatibilidade química entre esse material e outros elementos metálicos, no momento de solidificação lamelar.

A microestrutura metalográfica do revestimento AISI 420 (figura 4.17(a)) aspergido com os parâmetros operacionais ideais, possui compatibilidade visual com a microestrutura estudada por CASTELETT (2010). Na literatura assim como nessa análise, a microestrutura desse material possui poros, onde estes não se apresentam concentrados ou

alinhados, e uma boa massa lamelar uniforme. Essa formação microestrutura sustenta o bom resultado desse revestimento, frente ao ensaio de dobramento a 180°.

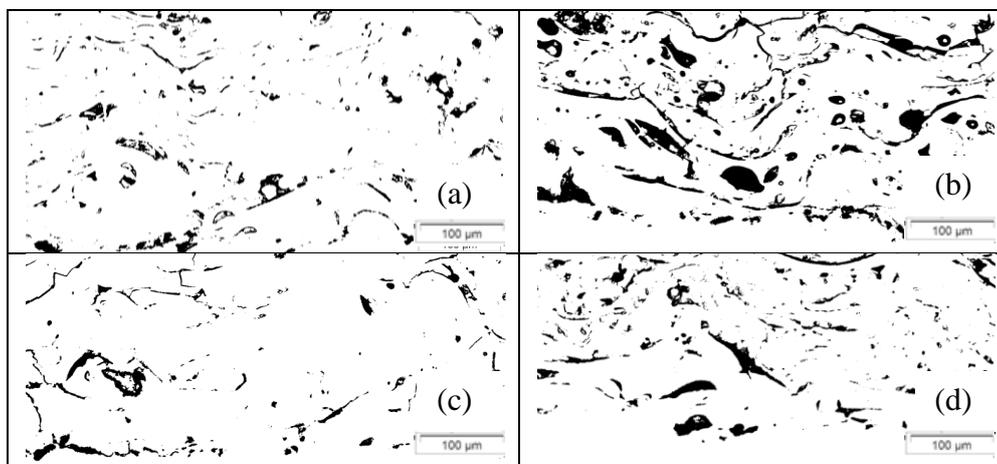


Figura 4.17 Índice de porosidade entre os materiais dos revestimentos. (a) Corpo de prova 5D (AISI 420+Ni-Al) (b) Corpo de prova 7C (Metco SM 8297+Ni-Al), (c) Corpo de prova 5B (Eutectic 595T+Ni-Al), (d) Corpo de prova 5E Inconel 625 + Ni-Al.

A tabela 4.4 apresenta os resultados das medições da espessura de camada, a taxa de porosidade e o valor de médio da microdureza dos revestimentos dos corpos de provas selecionados.

Tabela 4.4 Resultados das medições e espessura de camada metalizada, microdureza e porosidade

Amostra	Consumível	Espessura de camada (µm)	Microdureza (HV)	Porosidade (%)
5B	Eutectic 595T	312,69 ± 58,65	900 ± 179	2,8
7C	Metco SM 8297	409,99 ± 42,29	1044 ± 240	11,5
5D	AISI 420	497,15 ± 40,61	508 ± 85	2,1
5E	Inconel 625	475,48 ± 20,9	339 ± 37	3,5

Os valores obtidos com a medição da espessura total da metalização classificam-se como, aprovado dentro da norma Petrobras N-2568, por apresentarem valores entre 300 e 500 µm, e as características de microdureza dos revestimentos apresentam-se dentro dos valores indicados pelos fabricantes dos revestimentos.

A amostra 7C (WC-Ti) apresentou alto índice de porosidade (11,5%) caracterizando essa microestrutura aspergida, como muito frágil conforme conclusão de SHI-NING (2003). Ainda segundo a norma N-2568 é considerado ineficaz contra o mecanismo de

desgaste erosivo, o revestimento aspergido que apresenta na sua microestrutura índices de porosidades superiores a 5%, isso devido a fragilização da camada metalizada.

As amostras 5B, 5D e 5E apresentam-se um microestrutura de maior coesão lamelar por apresentarem índice de porosidade abaixo de 5%, conforme BEZERRA (2007).

#### 4.2 Ensaio de desgaste erosivo por partículas sólidas

A tabela 4.5 apresenta os valores de densidade teórica, porosidade e densidade aparente dos revestimentos estudados. A densidade teórica foi obtida através de especificações técnicas dos fabricantes dos consumíveis, já o valor da densidade aparente é fundamentalmente influenciado pela quantidade de porosidade contida nos revestimentos, sendo indispensável para o cálculo da taxa de erosão de cada material metalizado.

Tabela 4.5 Relação de densidades e porosidade dos materiais estudados

Consumíveis	Densidade Teórica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Densidade Aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
ASTM A178	7,86	7,86
Eutectic 595 T	6,74	6,55
Metco SM 8297	8,85	7,84
Metcoloy 2 (AISI 420)	7,70	7,54
Inconel 625	8,44	8,14

Na tabela 4.6 observar-se as marcas do ensaio erosivo acelerado, em ambos os ângulos de ataque dos erodentes.

O desgaste superficial é mais evidente nos consumíveis Metco SM 8297 e Inconel 625 em ambos os ângulos de ataque. Esses consumíveis apresentam nas suas composições químicas, elevados percentuais dos materiais: carbonetos de tungstênio (WC), cromo (Cr), carboneto de titânio (TiC), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e silício (Si). Esses elementos alteram a característica microestrutural da camada de revestimento aspergido, elevando a dureza da metalização e formando uma microestrutura frágil, caracterizado por inclusão de poros, microtrincas e oxidação.

Com a técnica de digitalização 3D, a linha de desgaste erosivo de uma amostra pôde ser analisada. Na figura 4.18 observar-se que durante o ensaio, o ataque dos erodentes a 30° na superfície do revestimento AISI 420 não ultrapassou 0,15mm de profundidade na região central do desgaste (maior incidência de erodentes). A maior coesão lamelar e

tenacidade do revestimento AISI 420 aspergido, são os fatores determinantes na menor taxa de desgaste visual apresentada nessa amostra, se comparado aos outros materiais erodidos também a 30°.

Tabela 4.6 Superfície das amostras pós-ensaio de erosão nos ângulos de incidência de 30° e 90°

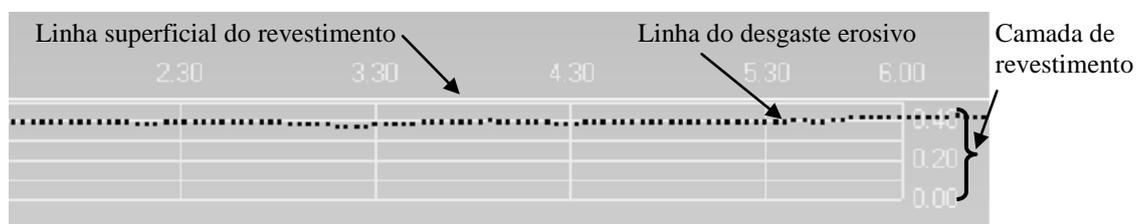
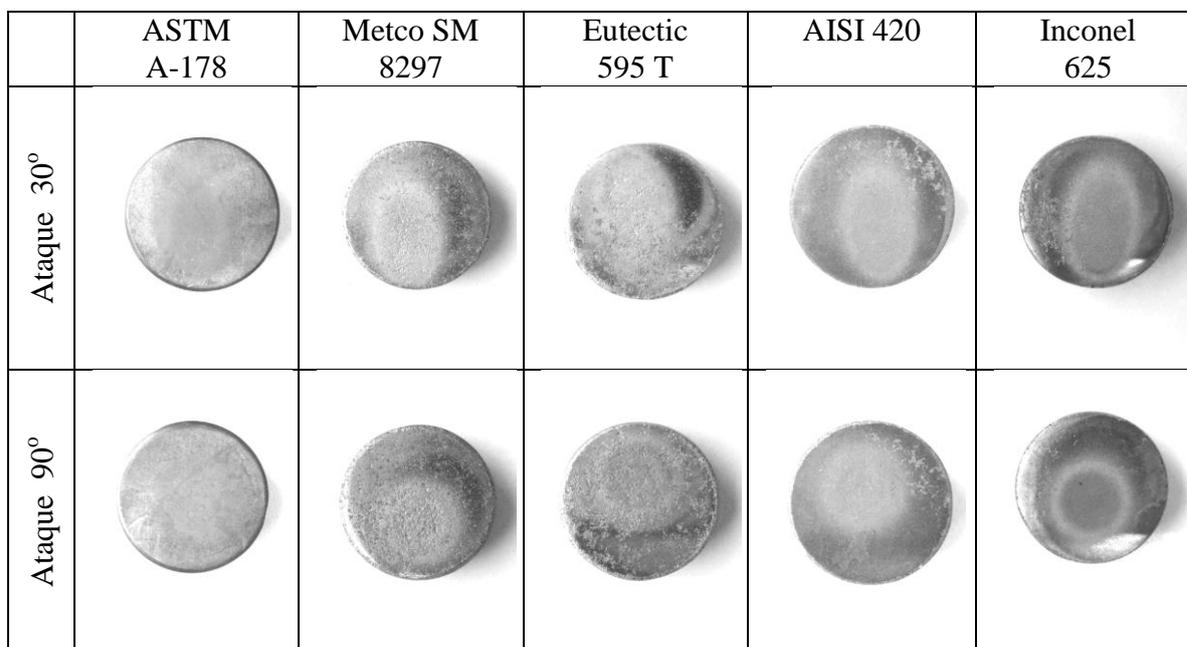


Figura 4.18 Secção transversal digital do revestimento AISI 420 da região desgastada a 30°

Observar-se na figura 4.19, que os revestimentos aspergidos se apresentaram menos resistentes ao desgaste erosivo, quando comparados ao material atualmente utilizado nos tubos dos trocadores de calor ar/gases, nas condições em que os ensaios foram realizados. Todavia, o revestimento com aço inoxidável AISI 420 foi o revestimento de maior resistência ao mecanismo de desgaste erosivo acelerado, dentre os revestimentos estudados, haja visto que este revestimento possui o menor índice de porosidade (2,1%), apresentando o melhor desempenho no ensaio de desgaste erosivo, confirmando assim uma

taxa de erosão muito próxima à taxa de erosão do aço ASTM A-178 em baixo ângulo de ataque (30°).

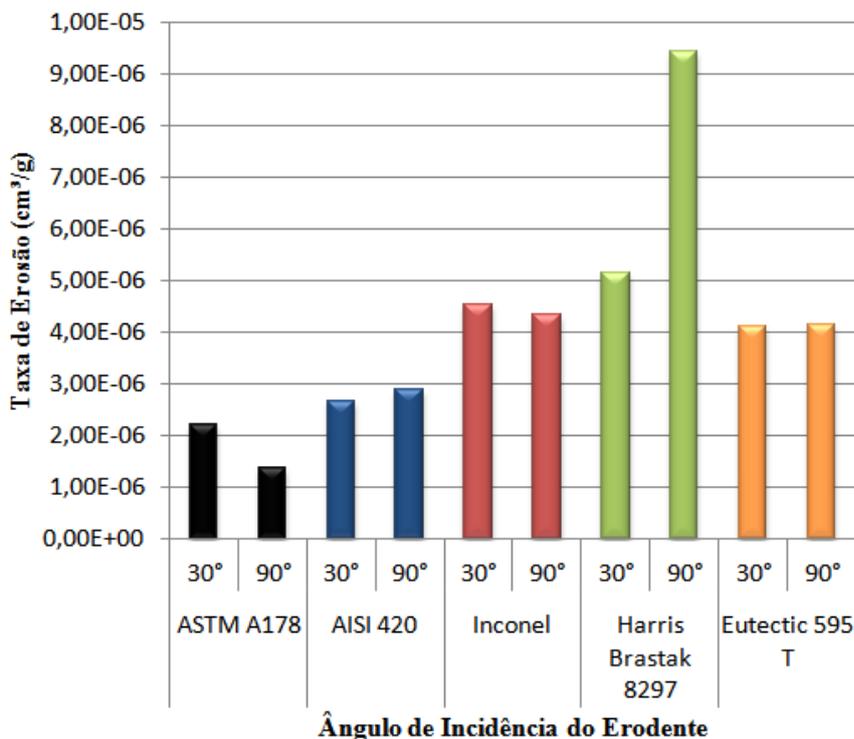


Figura 4.19 Comparativo da taxa de erosão entre os revestimentos aspergidos e o aço ASTM A-178

Os valores de taxa de erosão volumétrica, obtidos para cada revestimento em cada ângulo de impacto (tabela 4.7), confirmam que os revestimentos de alta microdureza associados ao índice de porosidade resultante do processo de metalização, são os mais afetados nos dois ângulos de ataque estudados.

Tabela 4.7 Resultados obtidos no teste de erosão por partículas sólidas.

Consumíveis	Ângulo de Impacto	Taxa de erosão (cm <sup>3</sup> /g <sub>erodente</sub> ) * 10 <sup>-6</sup>	Microdureza (HV)
Aço ASTM A178	30°	2,3	130 ± 6
	90°	1,4	
Eutectic 595 T	30°	4,1	900 ± 179
	90°	4,1	
Metco SM 8297	30°	5,2	1044 ± 240
	90°	9,5	
AISI 420	30°	2,6	508 ± 85
	90°	2,9	
Inconel 625	30°	4,2	339 ± 37
	90°	4,1	

De uma forma geral, os resultados de taxa de erosão foram inesperados por dois motivos: primeiramente o corpo de prova com maior resistência ao desgaste erosivo foi o aço ASTM A-178 (130 HV). Esse é o material de menor microdureza se comparado aos revestimentos aspergidos, o mesmo também é isento de porosidade (0%), e é o material com maior tenacidade dentre os demais estudados. Em segundo lugar as propriedades mecânicas dos revestimentos em alta temperatura, que em geral são superiores a do aço ASTM A-178, não ofereceram condições para conter a degradação das superfícies alvo dos erodentes no ensaio de desgaste erosivo. Os resultados mostram que a dureza não deve ser fator determinante ou orientativo, para a seleção do material em aplicações envolvendo desgaste erosivo por partículas sólidas.

No caso de revestimentos aspergidos, a porosidade apresenta importância fundamental sobre a resistência à erosão. O gráfico da figura 4.20 mostra que a taxa de erosão em ensaios de desgaste realizados com ângulo de incidência de erodente a 90° pode ser diretamente correlacionada, com o nível de porosidade encontrado no material analisado.

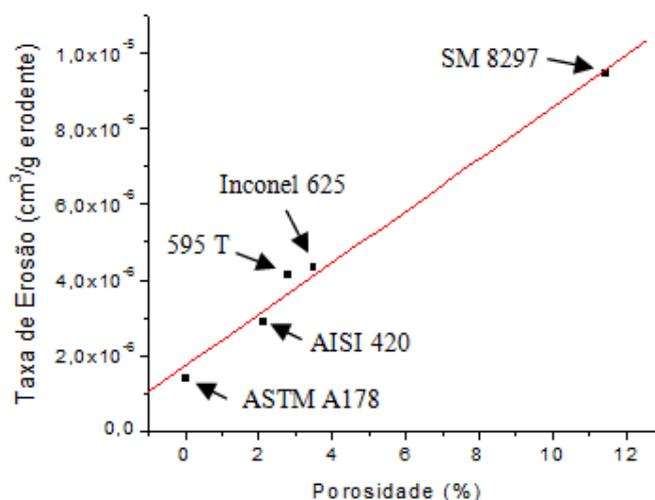


Figura 4.20 Taxa de erosão em ensaios de desgaste a 90°

A figura 4.21 apresenta o gráfico comparativo entre os ângulos de incidência de erodente a 30 e 90°. Pode ser observado, que no caso do aço ASTM A-178 a taxa de remoção de material é mais acentuada em baixos ângulos de incidência (30°), caracterizando-se assim um mecanismo dúctil de desgaste erosivo. Por outro lado, a taxa de desgaste do revestimento Metco SM 8297 (1044 HV) foi mais acentuada com ângulo de incidência de erodente a 90°, caracterizando como frágil o mecanismo de desgaste erosivo desse revestimento.

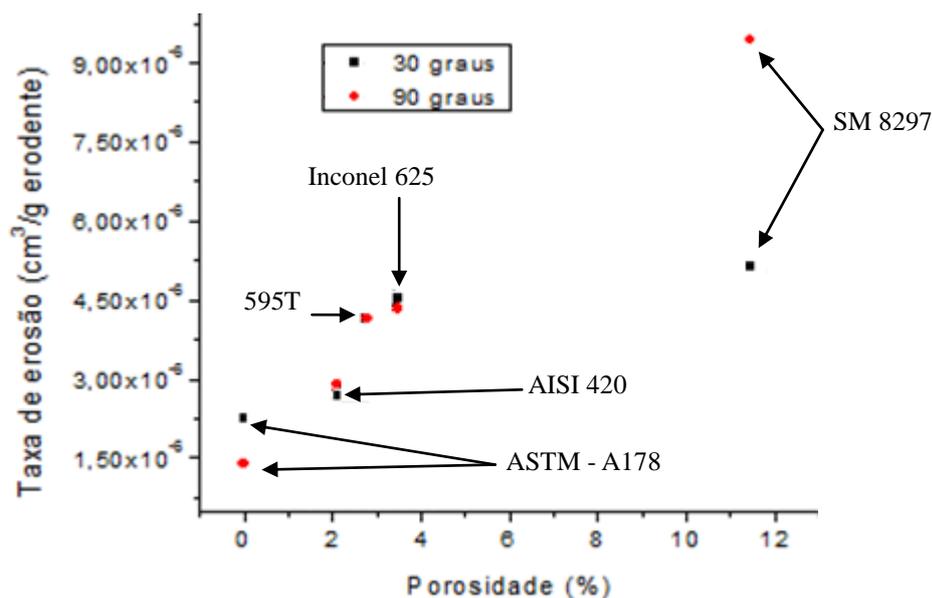


Figura 4.21 Influência da porosidade contida sobre a taxa de erosão

As microestruturas dos revestimentos aspergidos apresentaram, dependendo do tipo de liga, alguns constituintes típicos, tais como: partículas parcialmente fundidas, fases heterogêneas, óxidos e porosidade. Essa característica microestrutural pode explicar a baixa eficiência dos revestimentos aspergidos termicamente pelo processo *Arc Spraying*, contra o desgaste erosivo acelerado.

A figura 4.22, apresenta micrografias obtidas por microscopia ótica dos revestimentos AISI 420 e Inconel 625 depositados neste trabalho antes do processo de erosão.

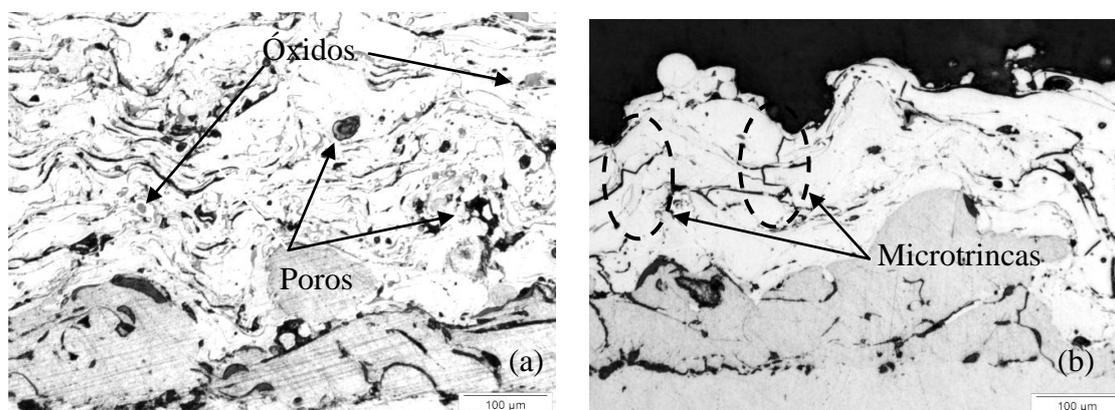


Figura 4.22 Micrografias óticas dos revestimentos. (a) Revestimento metalizado AISI 420, (b) Revestimento metalizado Eutectic 595T

Verifica-se que os revestimentos depositados com AISI 420 (figura 4.22(a)) e Inconel 625 (figura 4.22 (b)) apresentaram baixos níveis de oxidos e porosidade, conforme reportado na tabela 4.4 e estudos realizados por JUNIOR (2011) e VICENZI (2007). E ainda pode ser observado que o revestimento de Inconel 625 apresenta muitas microtrincas na sua microestrutura.

A interligação de poros da camada metalizada, durante o recebimento da energia de impacto dos erodentes no ensaio de desgaste erosivo, assim como as microtrincas provenientes do processo de solidificação da camada aspergida, diminuem substancialmente a tenacidade do material depositado por aspersão térmica VICENZI (2007). Tornando a superfície revestida muito frágil, culminando na alta taxa de erosão devido a facilidade de remoção da superfície do material metalizado.

Também pode-se observar que no revestimento do consumível SM 8297 (figura 4.23(a)), existe uma alta concentração poros e microtrincas na seção transversal da camada aspergida, sendo as microtrinca o principal problema de metalização da camada aspergida, confirmando a característica de elevada fragilização deste material. Já na metalização do Inconel 625 (figura 4.23(b)) é confirmada uma alta concentração de porosidade.

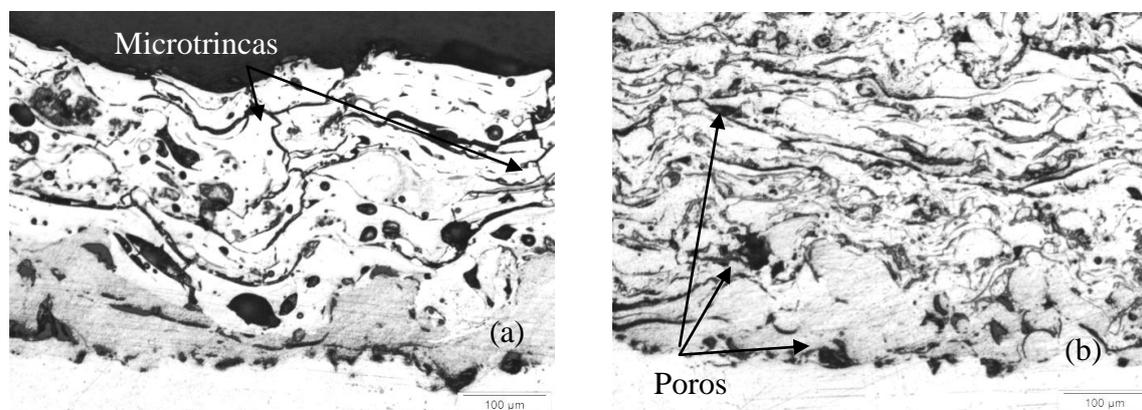


Figura 4.23 Micrografias ópticas dos revestimentos. (a) Revestimento metalizada Metco SM 8297, (b) Revestimento metalizado Inconel 625

Um melhor entendimento dos mecanismos de remoção de material pode ser realizado a partir das análises das micrografias obtidas por MEV. A figura 4.24 apresenta os resultados das superfícies erodidas do aço ASTM A-178 em ângulos de 30° e 90°. Verificou-se que quando erodido em baixo ângulo de incidência (30°), o material sofreu um mecanismo de desgaste por microcorte. Em alto ângulo de incidência (90°), observa-se uma intensa deformação plástica caracterizada pela presença de indentações com morfologia

angular proveniente da ação do erodente. Essas informações corroboram para o fato de que este material apresenta um mecanismo de remoção de material preponderantemente dúctil.

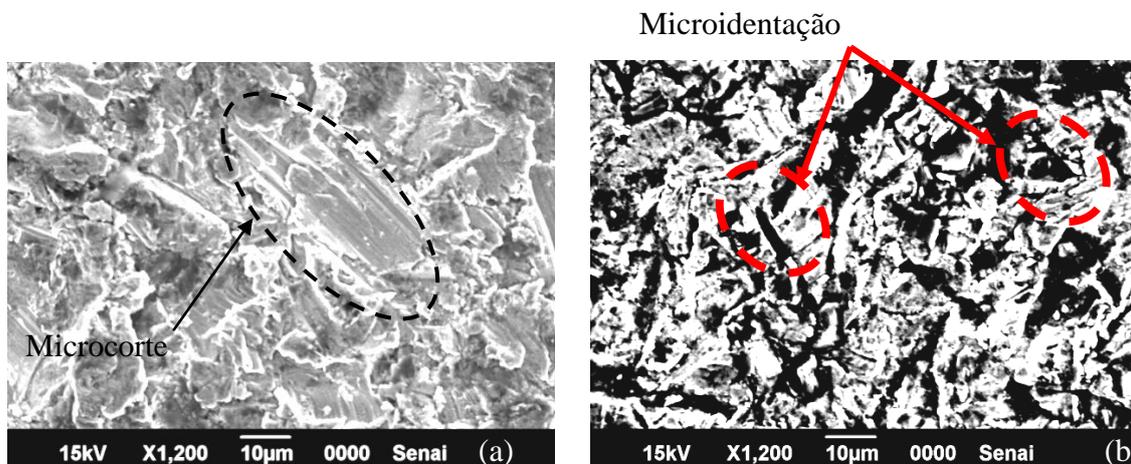


Figura 4.24 Superfície da amostra do aço ASTM A-178 após ensaio de erosão acelerada. (a) Erosão a 30°, (b) Erosão a 90°

Embora tenha sido constatada uma baixa perda de massa durante os ensaios de desgaste erosivo do aço ASTM A-178, verificou-se duas possíveis fontes de incerteza no cálculo da taxa de erosão dos corpos de prova. A figura 4.25-a apresenta uma evidência de incrustação de partículas de erodente em ângulos de 90°. Além disso, observou-se que quando submetidas a um ciclo térmico compatível com o ensaio (370°C por 80 minutos), corpos de prova desse material apresentaram um ganho de massa por oxidação da ordem de 2,6 mg (figura 4.25-b).

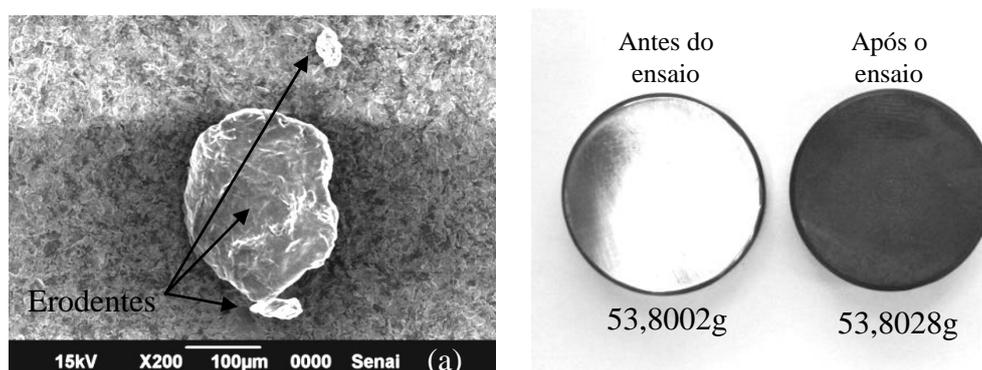


Figura 4.25 Corpo de prova com ganho de massa. (a) Incrustação de erodente no corpo de prova, (b) Ganho de massa por oxidação durante o ensaio de balança térmica

Considerando -se que a perda de massa no corpo de prova de ASTM A-178 erodido a 30° foi de 11,5 mg, enquanto que na amostra do revestido AISI 420 erodido a 30° foi de

12,8 mg, não existindo evidências suficientes para se afirmar que o aço ASTM A-178 apresente resistência ao desgaste erosivo superior ao material revestido, devido aos ganhos de massa por oxidação e por incrustação de erodente.

A observação no MEV das amostras revestidas com o aço inoxidável AISI 420 e Inconel 625 (figura 4.26) remetem para um mecanismo de remoção de material por erosão predominantemente dúctil, de forma semelhante ao aço ASTM A-178. Com baixos ângulos de incidência de erodente ( $30^\circ$ ) observa-se evidências de microcorte no revestimento metálico com AISI 420 (figura 4.26 (a)), e microindentações a  $90^\circ$  no revestimento metálico com Inconel 625 (figura 4.26 (b)).

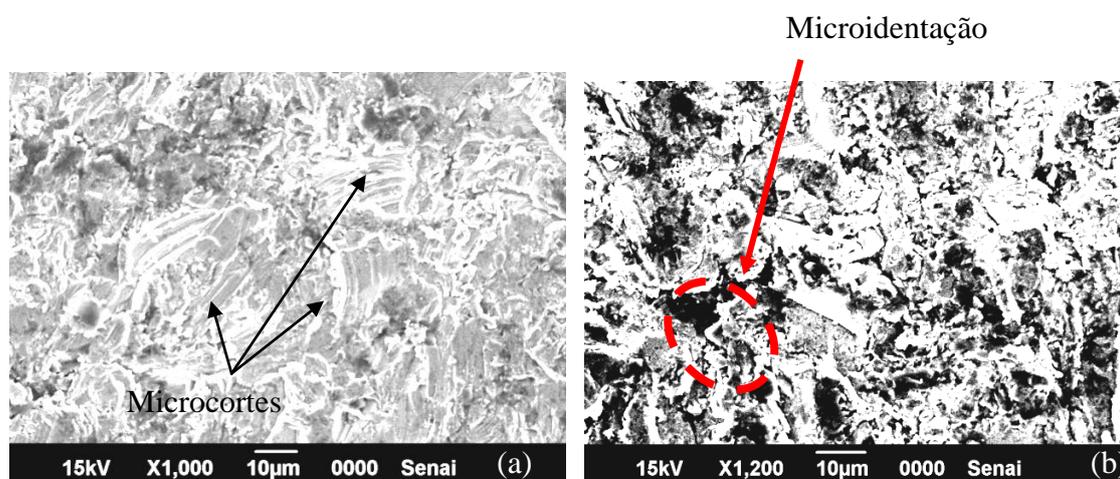


Figura 4.26 Mecanismo de desgaste erosivo a  $30^\circ$ . (a) Revestimento metalizado com AISI 420, (b) Revestimento metalizado com Inconel 625

Observa-se também a ocorrência de remoção de material atribuída a eventos de corte em alto ângulo de ataque (figura 4.27). No ângulo reto de ataque ( $90^\circ$ ) o erodente transfere mais energia no momento do impacto, isso acarreta um choque mecânico mais forte fazendo-se com que o erodente penetre cada vez mais dentro do revestimento. Essa penetração corrobora para o crescimento contínuo de um microsulcamento, pois o constante carregamento de energia pontual encontra na microestrutura aspergida um poro ou uma microtrinca. Esses problemas microestruturais potencializam as forças dos choques mecânicos, promovendo uma maior taxa de desgaste.

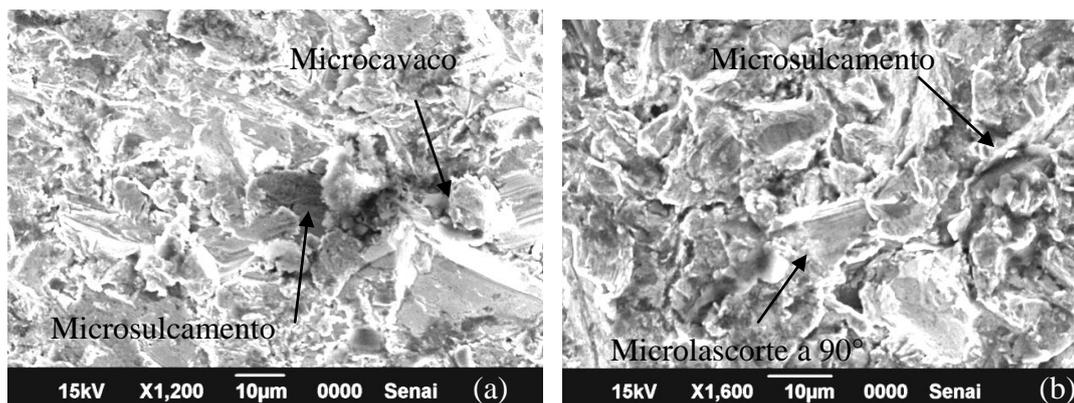


Figura 4.27 Mecanismo de desgaste erosivo a  $90^\circ$ . (a) Revestimento metalizado com AISI 420, (b) Revestimento metalizado com Inconel 625

A figura 4.28 apresenta micrografias também obtidas por MEV do revestimento depositado com Metco SM 8297 erodidas a  $90^\circ$ . A alta fragilidade deste material é caracterizada pela presença de uma rede de trincas interligadas, observadas previamente por microscopia óptica figura 4.28 (a). A fratura do material aspergido por mecanismo de clivagem é desencadeada, quando a microtrinca se propaga e encontra uma região metalizada com concentração de poros. Dessa forma, sugere-se que o fator preponderante para a elevada perda de massa nesse revestimento ocorra por lascamento de camadas do material metálico aspergido.

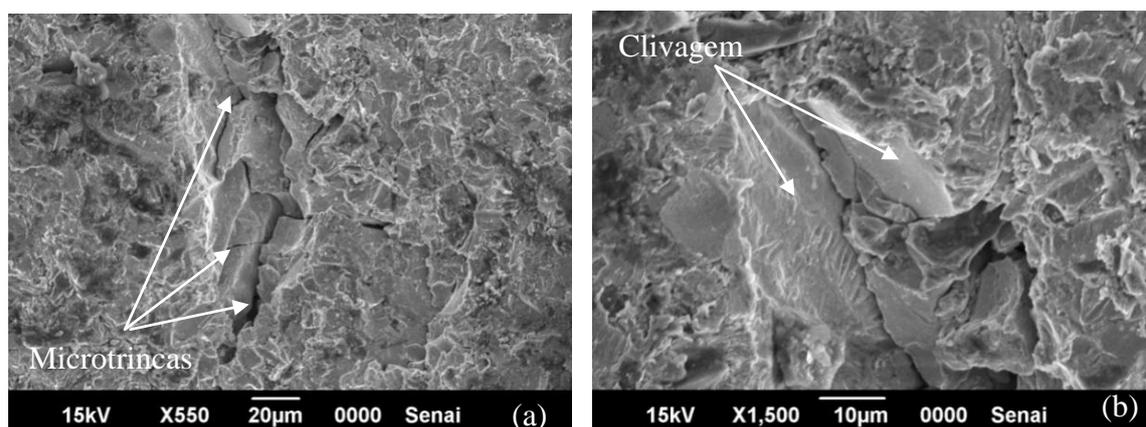


Figura 4.28 Superfície do revestimento com Metco SM 8297 erodido a  $90^\circ$ . (a) Região da superfície com concentração de trincas, (b) Remoção de material por fragmentação entre planos paralelos fragilizados por trincas

### 4.3 Estudo econômico

Visando a viabilidade econômica do processo de aspersão térmica a arco, foi escolhido o material AISI 420, devido ao bom resultado de resistência ao mecanismo de desgaste erosivo acelerado por partículas sólidas.

Dados dos ensaios de aspersão revelaram que o rendimento de metalização com espessura da camada aspergida de 0,4 mm foi de aproximadamente 42%, com uma taxa deposição aproximada de 1,5  $\frac{g}{s}$ . Foram utilizados nesse estudo, os mesmos parâmetros operacionais de aspersão térmica, ajustados para a metalização das amostras do ensaio de desgaste erosivo acelerado.

Essa taxa de deposição foi medida em 400 mm de comprimento do tubo, ou seja, em uma escala (1:10) do comprimento real de utilização dentro do trocador de calor. Foi consumido nessa aspersão 1194 mm de arame, o que corresponde a 237g de aço inoxidável AISI 420 aspergido. Conforme informação do fabricante, o consumível Mecoloy 2<sup>®</sup> é comercializado ao custo de R\$ 18,93/kg, determinando o custo de R\$ 11,20/m de tubo aspergido com este material.

Foi considerado nesse estudo, o consumo de energia elétrica operacional para realizar a aspersão térmica. A tabela 4.8 apresenta o consumo de energia para cada etapa de aspersão térmica.

Tabela 4.8 Consumo de energia elétrica operacional

Etapas operacionais	Potência instalada (kW)	Tempo utilizado (h)	Consumo (kWh)
Arco elétrico	3,000	0,045	0,135
Ar - Aspersão	11,000	0,158	1,739
Exaustor	0,550	0,158	0,087
Bancada	0,920	0,158	0,145
Secador de ar	0,954	0,316	0,302
Ar - Jateamento	11,000	0,158	1,739
Total	27,424	0,993	4,146

O estudo revela que a operação total de metalização consome 4,146 kWh, para uma camada aspergida de 0,4 mm em 400 mm de comprimento. Multiplicando esse valor pela a tarifa de energia de R\$ 0,25/kWh, entre 18h30min e 21h30min, obtêm-se o custo operacional de R\$ 1,04. Mantendo a mesma proporção escalar de 1000 mm aspergidos, deverá ser gasto aproximadamente R\$ 2,6 de energia elétrica para recobrir os tubos.

Somando-se o valor da energia elétrica operacional ao valor do arame AISI 420 consumido, a metalização estudada obtém um custo total R\$ 13,80/m.

Pesquisas de mercado definem que o custo para aquisição dos tubos em ASTM – A178 é de aproximadamente R\$ 15/m. Dessa forma haverá em investimento de R\$ 1.209.600,00 para comprar todos os tubos do trocador de calor. Sobre esses tubos deverá ser depositada uma camada de revestimento em AISI 420, e estipula-se o valor de R\$ 278.208,00 para metalização de todos os tubos. Assim deverá ser investido R\$ 1.487.808,00 na instalação de tubos com uma camada protetora contra o desgaste erosivo provocado pelas cinzas leves do carvão.

Em segunda análise o valor (custo) para aquisição dos tubos em AISI 420 nas dimensões requeridas pelo fabricante do equipamento é aproximadamente R\$ 60,00/m. Sendo assim um único tubo deve custar R\$ 240,00, gerando um custo hipotético de R\$ 4.838.400,00 para instalação de todos os tubos desse material dentro.

Nesse estudo fica evidente uma economia superior a R\$ 3.350.000,00, viabilizando o processo de aspersão térmica a arco, caso seja estimado o custo de R\$ 200.000,00 para montar toda a estrutura empresarial capaz de realizar a metalização com segurança operacional e ambiental, e R\$ 14/hora para a mão de obra técnica habilitada.

## 5 CONCLUSÕES

O secador de ar comprimido mostrou-se fundamental conforme ensaios da norma Petrobrs N-2568, por não existir indícios de umidade e contaminantes no ar comprimido. Dessa forma, a redução do nível de óxidos na camada aspergida foi satisfatória, reduzindo por sua vez a porosidade nos revestimentos estudados.

Os parâmetros operacionais de jateamento ajustados no equipamento, para a produção de texturizações superficiais foram considerados ideais ( $R_a = 7 \mu\text{m}$ ). A eficiência de preparação superficial do substrato é inversamente proporcional ao tamanho do erodente em cada ciclo de reutilização. Erodentes reutilizados acima do terceiro ciclo de jateamento devem ser descartados, por produzir uma superfície de menor rugosidade média que o indicado.

O uso de uma camada de amanteigamento em Ni-Al para melhorar a adesão do revestimento duro ao substrato, foi determinante para adequação dos corpos de prova a norma N-2568. As características microestruturais de alta dureza, e alta taxa de porosidade são fatores que diminuem a adesão do revestimento ao substrato.

Os revestimentos em AISI 420 apresentaram uma taxa de erosão volumétrica, muito próxima a do aço ASTM A178. Essa evidência da microestrutura mostra que a camada metalizada é capaz de retardar o efeito dos mecanismos de desgaste na superfície do substrato, com isso pode-se aumentar o tempo de operação dos tubos revestidos. Existe porém, uma incerteza, nos valores obtidos no ensaio de erosão do aço ASTM A 178, devido aos ganhos de massa por incrustações de partículas erodentes sobre a superfície desgastada e, principalmente, por oxidação. Desta forma, medidas comparativas efetivas só poderão ser realizadas mediante a avaliação dos resultados nas condições de desgaste erosivo em operação.

O desgaste erosivo de revestimentos metálicos está fortemente correlacionado aos defeitos presentes nas microestruturas, particularmente porosidades e microtrincas.

O revestimento SM 8297 apresentou o pior comportamento frente ao desgaste erosivo, em virtude de sua elevada microdureza média (1044 HV), elevada densidade de microtrincas e também elevada porosidade (11,5%).

O revestimento com aço inoxidável AISI 420 propiciou o melhor desempenho em relação ao desgaste erosivo (caracterizado por obter as menores taxas de erosão), devido à baixa porosidade (2,1%) e níveis médios de dureza (508 HV).

O estudo econômico revelou que metalização do revestimento AISI 420, nos parâmetros operacionais de aspersão para o ensaio de desgaste erosivo, obteve um rendimento de 42%, em uma aspersão de 0,4 mm de espessura e 400 mm de comprimento, sendo a aspersão termica nesse caso, totalmente viável.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o comportamento dos revestimentos depositados por aspersão térmica a arco, em diferentes parâmetros operacionais da bancada como: sentido de rotação horária dos corpos de prova, menor velocidade de deslocamento da tocha e menor rotação dos tubos.
- Desenvolver um sistema de aquecimento para ar comprimido em alta vazão, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de entrada do gás de atomização no processo de reestruturação lamelar dos revestimentos aspergidos.
- Examinar a influência de gases inerte como Argônio e Hélio na microestrutura do material metalizado, frente ao surgimento de porosidade na camada revestida. Para isso existe a necessidade do desenvolvimento de uma cabeça de aspersão diferenciada, a qual possibilite a injeção adicional dos gases inertes na zona do arco elétrico.
- Depositar revestimentos depositados com a mistura dos aços inoxidáveis AISI 420 e AISI 316, sobre um substrato com deposição prévia Ni-Al (camada base), e investigar os mecanismos de remoção de material frente ao desgaste erosivo por partículas sólidas, em baixo e alto ângulo de ataque.

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANGIOLETTO, E. **Minimização da corrosão e erosão em trocadores de calor tipo tubos e carcaça em usinas termoeletricas a carvão**. Relatório final apresentado ao Projeto ANEEL TRACTEBEL 0403-010-2005, Convênio No TMS.NAJL.Criciúma-UNESC, 2009,

ASTM A 178. *Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes*, Vol. 03.03. 2002.

ASTM G76-95, *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*, Vol. 03.02, 1996.

BALL, A. *The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials*, J.S Afr. Inst. Min. Metal., v.86, 1986.

BEZERRA B Santos L. **Estudo para prevenção de falhas de hastes de bombeio de petróleo através de aplicação de revestimento Ni-Cr**. Dissertação para obtenção de título de mestre em Engenharia de Processos. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Processos – PEP. Universidade Tiradentes. Aracaju, 2007.

BUQIAN, W. e LUER, K. *The relative erosivity of limestone, dolomite and coal samples from an operating boiler*, *Wear*, 1998.

CASTELETT, L. C. FERNANDES, F. A. P., TAKEYA G. S., PICON, C. A., TREMILIOSI Filho G. **Avaliação da resistência à corrosão do aço AISI 420 depositado por processos variados de aspersão térmica**. Revista Escola de Minas 2010.

CHANDLER P. E., QUIGLEY M. B. C. *The application of plasma-sprayed coatings for the protection of boiler tubing*, in: *proceedings of the 11th international thermal spraying conference, Montreal, 1986*.

CHATTOPADHYAY, R. *Surface Wear: analysis, treatment and prevention*. ASM International, 2001.

CONTEC N-2568. **Norma técnica aplicada pela Petrobras: Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica**. Rio de Janeiro, 2004

COSTA R. C., ROCHA A. S., KEJELIN N. Z. **Estudo do Desempenho de Revestimentos Metálicos Depositados Pelo Processo de Aspersão Térmica à Arco, em Relação ao Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases**. 38º Congresso Nacional de Soldagem - CONSOLDA, Minas Gerais 2012

CRAWMER D.E. *Coating Structures, Properties, and Materials*. ASM International, 2004.

CUTTLE A. J. *Fire-side corrosion in power station boilers*, CEGB Research Report, 1978.

DAVIS J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International, 2004.

DIVAKAR M., AGARWAL V. K. e SINGH S. N. *Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI 316*, *Wear*, vol. 90, 2005.

FINNIE, I., *Some reflections on the past and future of erosion*. *Welding Journal*, 1993.

FREIRE, F. *Evaluation of Applied Coatings by Thermal Spraying for Protection Against Wear Tips for Risers*. Grau de Doutor em Ciências, na área de Reatores Nucleares de Potência. IPEM São Paulo 2000.

HALLDEARN, R. *Arc thermal spray process*. <http://www.twi.co.uk>. Acesso em 20 de 08 2011

HOOP, P. J., ALLEN, C. *The high temperature erosion commercial thermally sprayed metallic and cermet coatings by solid particle*, *Wear*, 1999.

HOOPERT, S. *Alumina ceramics: superior materials for protection against wear and corrosion*. 1989

HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

HUTCHINGS, I. M., *Proc conf. on erosion/corrosion of coal conversion system materials* 1979

JUNIOR, L. A. M. B. **Análise comparativa da viabilidade financeira entre projetos de geração termoeétrica a gás e a carvão no Brasil**. Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissionalizante em Administração como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Administração. Área de Concentração: Administração Geral. Ibmecc - Programa De Pós-Graduação E Pesquisa Em Administração E Economia. Rio de Janeiro, 2008

JUNIOR, O. R. **Viabilidade dos revestimentos anticorrosivos com Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ Cu, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ Ni e Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ Al aplicados por aspersão térmica para estruturas enterradas de Linhas de Transmissão**. Tese apresentada como requisito à obtenção de grau de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais - PIPE. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2011.

KEJELIN, N. Z. **Influência de soldagem na formação das zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares**. Dissertação como obtenção do título de mestre em ciência e engenharia de materiais. UFSC, Florianópolis 2006

KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. John Wiley e Sons, 2nd ed. New Jersey, United States, 2003.

KULU, P.; ZIMAKOV, S. *Wear-resistant composite coatings*. *Surface Engineering*, EUROMAT 99, v. 11, Ed. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2000.

LAERCE, P.N. **Fundamentos de Resistência a Corrosão**. 1 ed. Rio de Janeiro. Interciencia, 2007

LEVY A.V., *Solid Particle Erosion And Erosion-Corrosion Of Materials*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.

LEVY, A. V.; WANG, B. Q. Erosão dos sistemas de revestimento rígido materiais. *Wear*, 1988.

LEVY, A.V., *Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials*, ASM international, Materials Park, Ohio, 1995

LIMA C. R. **Aspersão térmica – Fundamentos e aplicações**. São Paulo 2003.

LIMA, C. R.. **Estudo e caracterização de revestimentos para desgaste aplicados por aspersão térmica a chama oxicomustível de alta velocidade – HVOF**. São Paulo 2003.

LUDEMA, K.C. *Friction, Wear, Lubrication: a Textbook in Tribology*. 2003.

MARQUES, P.V. **Aspersão Térmica – INFOSOLDA**. [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). 2009. Acesso em 12 de novembro de 2011

MAZUR R. L. **Análise do desgaste erosivo por partículas sólidas em superfícies a base de Níquel**. Dissertação para obtenção de título de mestre em engenharia, do programa Projetos e Materiais. Guaratinguetá, 2004

NORMA DIN 50320. **Análise sistemática dos processos de desgaste classificação dos fenômenos de desgaste**. Metalurgia e materiais. 1997

PAWLOWSKI, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Second R. Chattopadhyay Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention*. 2008

RIGGS, W. *Metallography and image analysis, Handbook of Thermal Spray Technology*, 2004.

ROCHA. A da Silva. **Influência do estado superficial prévio na nitretação a plasma do aço AISI M2**. Tese apresentada como obtenção do Grau de Doutor em Engenharia, na área de Metalurgia. UFRGS Porto Alegre 2000

ROZENFELD, L.L. **Atmospheric corrosion of metals**, NACE, Houston, Texas, 1972,

SCHIEFLER, Marcos F. O. BUSCHIBELLI, A. J. **Estudo eletroquímico e microestrutural de revestimentos aspergidos termicamente para a proteção do aço contra corrosão marinha**. 6º Conferência sobre Tecnologia de Materiais. 2002

SHI-NING M., JUN-ZHI H., XUE-RONG C., CHANG-QING L., HAI L. Q. J. *Erosion Resistance of Arc Spray Composite Coatings at High Temperature on Boiler Tubes of Pulverized Coal Fired Power Station*. ASM International, Materials Park, Ohio, 2003

SILVA, F. J.; **Erosão, Corrosão, Erosão-Corrosão e Cavitação do Aço ABNT 8550 Nitretado à Plasma**. Tese apresentada como obtenção do Grau de Doutorado. Em Engenharia Mecânica. UFU – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.

SUCKLING, M., ALLEN, C., *Critical variables in high temperature erosive wear*. *Wear*, 1997.

SUNDARARAJAN, G. e ROY, M. *Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures*. *Tribology International*, 1997.

TASSI, R. **Revestimentos superficiais via PAPVD e avaliação do desempenho de bicos pulverizadores de suspensão cerâmica**. Dissertação para obtenção de título de mestre em engenharia. PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre. 2010

VICENZI, J., BERGMANN, C. P., AZEVEDO, M. D., CAMARGO, F. M., CAMARGO, F., **Comparação entre o desgaste erosivo de revestimentos NiCr aspergidos por HVOF e nanoestruturados à base de CrBMoWMnFe aspergidos por Arco Spray**, In: 9ª. COTEQ – Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, BA, Brasil, junho de 2007

VICENZI, J., MARQUES, C. M., BERGMANN, C. P., **Desgaste erosivo a frio e a quente em revestimentos de NiCr aspergidos termicamente: influência da porosidade e da oxidação**, 17º CBECIMat, 2006.

WHEELER, D. W., WOOD, R. J. K., *Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves*. *Wear*, 2005.

WILDEN J. S. JAHN, S. REICH, S. - *Surface and Coatings Technology*. 2008.

ZANINI L.C. et AL. **Estudo de alternativas para minimização do desgaste erosivo e corrosivo em trocadores de calor de usinas termoeletricas a carvão**. Florianópolis 2007