

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.

Brainer Rodrigues Martins¹, Norton Zanette Kejelin¹.
brainer.rm@hotmail.com¹, norton.kejelin@satc.edu.br¹

¹ Faculdade SATC, Engenharia Mecânica - Rua Pascoal Meller, 73 - CEP 88.805-380 - CP 362 - Criciúma - SC - Brasil.

Resumo

Uma alternativa à utilização de materiais resistentes à erosão por partículas sólidas e de elevado custo para tubos de trocador de calor ar/gases de usinas termelétricas 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 confecção de revestimentos contra desgaste são por *HVOF (High-Velocity Oxyfuel)*, *PS (Plasma Spraying)* e *AS (Arc Spraying)*. O processo de aspersão térmica a arco (*AS*) propicia alta produtividade por uma maior taxa de deposição quando comparado a outros processos, e além do custo operacional ser significativamente inferior para produção de revestimentos em massa, assim foi determinado o método *AS* para fabricação e caracterização dos revestimentos. Foram utilizadas para estudo quatro ligas metálicas contra o desgaste erosivo, comparadas ao material ASTM 178 grau A, o qual é empregado nos milhares dos tubos do trocador de calor. A avaliação foi feita a partir de ensaios de erosão acelerado, de acordo com a norma ASTM G76. 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 material (ASTM A178) atualmente empregado nos tubos dos trocadores de calor ar/gases.

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

1. Introdução

A erosão em tubos de trocadores de calor por cinzas leves em alta temperatura no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda (CTJL), é um sério problema por causa da natureza agressiva das cinzas, as quais contêm alta quantidade de quartzo. O carvão mineral das jazidas da região do extremo sul de Santa Catarina, quando queimado, possui uma elevada quantidade de cinzas, aproximadamente 43%. A principal causa da inatividade das usinas termoelétricas é devido ao desgaste erosivo intenso e localizado nos tubos de trocadores de calor e outras partes estruturais, o que poderia explicar pela faixa de 50% a 75% do seu tempo de detenção total (Cuttler, 1978). Os custos de manutenção para a substituição dos tubos erodidos nas mesmas instalações são elevadíssimos, e podem ser estimados em até 54% dos custos totais de produção (Chandler e Quigley, 1986). A alta temperatura de oxidação e erosão pelo impacto das partículas de cinzas em suspensão e partículas de carbono não queimado são os principais problemas a serem resolvidos.

Nos últimos anos, revestimentos aspergidos termicamente têm sido aplicados cada vez mais em tubos de caldeiras, particularmente nas áreas mais vulneráveis, com o objetivo de reduzir a taxa de erosão por partículas sólidas, e assim prolongar a vida dos tubos. Geralmente, esses revestimentos são escolhidos com base na boa resistência à oxidação em altas temperaturas e são principalmente ligas contendo alta quantidade de níquel e/ou cromo. Embora tenha sido relatado que revestimentos metálicos coerentes e depositados uniformemente podem fornecer proteção contra a erosão, somente um pequeno número de experimentos foram desenvolvidos para quantificar o desempenho desses materiais (Van Niekerk, 1993).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de resistência à erosão em uma série de revestimentos comerciais aspergidos termicamente, usando a técnica de aspersão térmica a arco *AS* (*Arc Spray*), e ensaiando numa temperatura de 370°C, onde os tubos do trocador de calor estão mais vulneráveis a danos causados pelo impacto das partículas erodentes. E também de minimizar as falhas causadas pelo desgaste erosivo, aumentando a vida útil do aquecedor tubular e, por consequência, reduzindo os custos de manutenção e perdas por indisponibilidade de geração.

2. Revisão Bibliográfica

Esta etapa apresenta de forma sucinta os conceitos básicos do funcionamento do trocador de calor ou aquecedor tubular, dos mecanismos de desgaste erosivo e do processo de aspersão térmica a arco, visando a melhor compreensão da problemática que envolveu este trabalho de pesquisa.

2.1 Caracterização do Problema

Os aquecedores tubulares da UTLB (Unidade Termoelétrica Jorge Lacerda B) unidades 5 e 6 do CTJL (Tractebel Energia) são do tipo recuperativo de fluxo cruzado, os quais têm, por finalidade, promover a troca térmica entre os gases resultantes da queima do carvão na caldeira com o ar atmosférico, para ser utilizado na queima e arraste de combustível (Carvão Mineral), conforme Fig. 1a. Para melhor identificação, os bancos são nomeados de acordo com a Fig. 1b, a qual descreve a representação da entrada e saída dos gases de combustão e do ar atmosférico, frio e quente. O equipamento é constituído por três aquecedores (1, 2, 3) com quatro bancos por aquecedor (A, B, C, D), totalizando doze bancos. As características técnicas do aquecedor tubular e os dados operacionais estão apresentados na Tab. 1 a seguir.

Tabela 1 - Características técnicas e dados operacionais.

Quantidade de tubos instalados	20.160
Comprimento dos tubos (mm)	4.860
Material original dos tubos	ASTM 178 - Grau A
Quantidade de Aquecedores	3
Quantidade de bancos por aquecedor	4
Especificação dos tubos	Ø 57,15 x 2,5 mm
Temperatura do ar limpo	40°C (entrada) - 290°C (saída)
Temperatura dos gases de combustão	370°C (entrada) - 160°C (saída)
Velocidade máxima dos gases de combustão	15,6 m/s

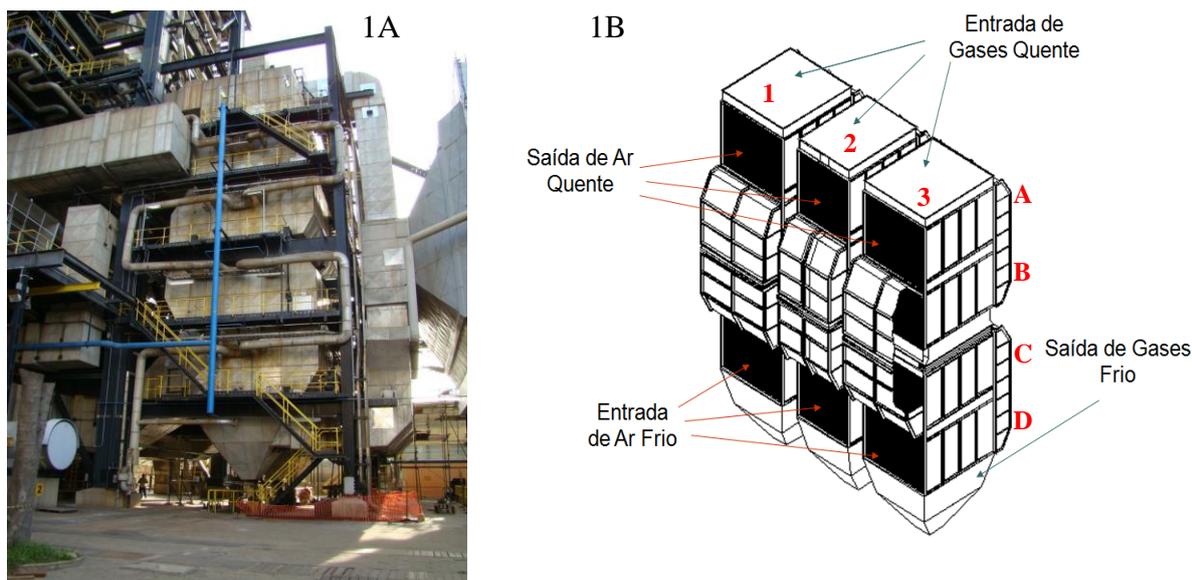


Figura 1- (a) Aquecedor tubular da UTLB. (b) - Identificação dos bancos (A, B, C e D) e dos aquecedores (1, 2, 3) do trocador de calor Ar/Gases.

O desgaste erosivo por partículas sólidas é um problema crítico nas indústrias de geração de energia elétrica que utilizam carvão mineral como a principal fonte térmica. A queima deste combustível gera um alto teor de cinzas leves a qual, conduzida pelo fluxo de gases de combustão, provoca a erosão nos aquecedores tubulares. Essa erosão guia para um descontrole da manutenção, perda de rendimento e um alto custo para a troca dos tubos.

Através da análise química da cinza de carvão, verifica-se que esta é composta em sua maioria de SiO_2 (55,22%) e Al_2O_3 (31,67%) e outros óxidos fundentes como o Fe_2O_3 , CaO mais significativos. De acordo com Buqian Wang e Kevin Luer (1998), a ação de desgaste que a cinza de carvão pode causar está relacionada a elementos erosivos como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , compostos esses de maior dureza.

As cinzas leves, ao serem arrastadas pela pressão do ventilador que as forçam juntamente com os gases quentes a passarem sobre os tubos do trocador de calor, causam desgaste por erosão numa maior intensidade nos tubos dos bancos A1, A2 e A3, devido à velocidade ser maior nesta área. Não sendo descartada a possibilidade de erosão nos bancos B e C. A falha que ocorre nos aquecedores tubulares, devido ao desgaste erosivo por partículas sólidas, é mostrada em detalhe na Fig. 2.



Figura 2 - Tubo do aquecedor tubular que sofreu desgaste por erosão.

Os tubos atualmente empregados nos aquecedores são fabricados de acordo com a norma ASTM 178 grau A, e caracterizados como materiais dúcteis por possuírem um alongamento de no mínimo 35% e uma baixa dureza (120 HV). Fica evidenciado, a partir da Fig. 2, um maior desgaste nos tubos do trocador ângulos de ataque de erodente diferentes da normal (baixo ângulo de ataque), característico de materiais dúcteis.

Os tubos, quando perfurados, são submetidos a algum tipo de reparo ou isolamento, como por exemplo, a realização do tamponamento dos tubos, obstruindo o fluxo de ar e reduzindo a eficiência de troca térmica. Sendo necessária, a cada 3 anos, a substituição de 50% da quantidade total dos tubos instalados no equipamento, obtendo desta forma o aumento dos custos por parada de produção, agregado ao custo de manutenção.

2.2 Desgaste Erosivo por Partículas Sólidas

De uma forma geral, o desgaste erosivo se caracteriza por danos causados devido ao impacto sucessivo de partículas sólidas e duras, arrastadas por um fluxo de gás ou líquido, ocasionando a perda de material num determinado equipamento ou componente, Fig. 3. As variáveis que afetam a severidade da erosão são:

- 1) **Variáveis relativas ao impacto (operacionais):** velocidade da partícula (V), ângulo de impacto (α), temperatura, número de partículas por unidade de área por unidade de tempo, corrosividade do meio;
- 2) **Variáveis relativas à partícula erosiva:** tipo de material, tamanho, forma, densidade, dureza;

3) **Variáveis relativas ao material (superfície):** tipo de material, morfologia, nível de tensões, dureza, densidade, rugosidade, tenacidade.

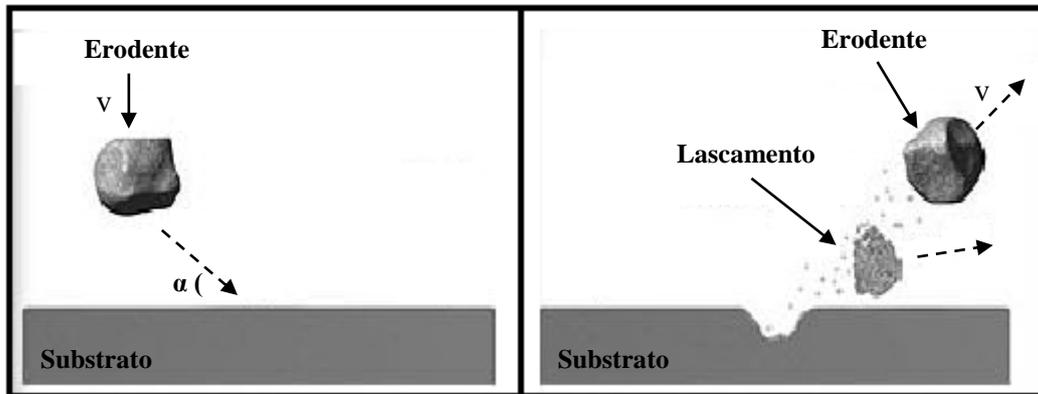


Figura 3 - Mecanismo de desgaste erosivo adaptado (Surface Engineering, 2011).

Segundo Wheeler e Wood (2005), em materiais dúcteis a taxa de erosão é maior em baixos ângulos de colisão, em contraste aos materiais frágeis, os quais apresentam suas maiores taxas de desgaste erosivo em ângulos próximos a 90°. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pela diferença de mecanismos de desgaste erosivo envolvidos em cada situação. A Fig. 4 apresenta uma curva típica de metal dúctil, demonstrando e relacionando o mecanismo de desgaste com o ângulo de ataque do erodente, nota-se que em (1) o mecanismo de remoção é por microcorte, (2) microsulcamento (abrasão) e (3) o mecanismo atuante de remoção é por deformação plástica (formação de protuberâncias).

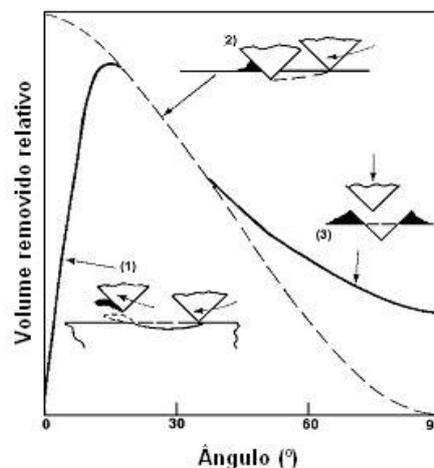


Figura 4 - Curva experimental para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e três mecanismos postulados para remoção de material (Finnie, 1995).

Embora o grande número de variáveis que influenciam no desgaste erosivo resulte num fenômeno complexo e de difícil mensuração, tem-se feito 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 G76 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 os melhores materiais resistentes à erosão sob condições específicas de testes, calculando a taxa de desgaste erosivo a partir da Eq. (1):

$$T_{\text{volume}} = \frac{(m_i - m_f)}{m_e * \rho_{\text{ap}}} \quad (1)$$

Onde:

T_{volume} = taxa de erosão volumétrica ($\text{cm}^3_{\text{alvo}}/\text{g}_{\text{erodente}}$);

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final da amostra (g);

ρ_{ap} = densidade do revestimento (g/cm^3).

Levy (1995) observou que para partículas erodentes com dureza de pelo menos duas vezes menor que a do material alvo não há influência na taxa de erosão. O uso de materiais com dureza superior a de partículas erosivas encontradas na natureza, tais como a sílica que possui dureza da ordem de 800HV, pode resultar numa maior resistência ao desgaste por partículas duras. Dessa maneira, a dureza da superfície alvo deve ser de 1,2 vezes maior que a dureza das partículas erosivas (Hutchings, 1992). Esta relação é válida quando o mecanismo de desgaste é o microcorte, onde a propriedade de maior significância na taxa de desgaste é a dureza (Silva, 2008). Contudo, um aumento deliberado da dureza não deve ser realizado em detrimento à tenacidade. Caso contrário, o impacto das partículas erosivas pode causar fraturas frágeis (Divakar *et al.*, 2005).

Quando o mecanismo atuante é por fratura frágil, em ângulos de incidência normal, a tenacidade também tem uma parcela importante na resistência à erosão. O desgaste erosivo de materiais frágeis, como por exemplo, cerâmicos, ocorrem basicamente pela formação e propagação de trincas. Um aumento na tenacidade desses materiais pode ocasionar em uma maior resistência ao desgaste erosivo (Finnie, 1995).

Assim, as variáveis do material devem ser sempre analisadas com base nos mecanismos de erosão predominantes. Alteração nesses mecanismos devido às condições de

erosão (velocidade de impacto, ângulo de incidência, tipo de fluido, fluxo de partículas, etc...) podem modificar completamente qualquer classificação dos materiais com base na taxa de erosão.

2.3 Aspersão Térmica a Arco

Existem diversos processos de aspersão térmica, que são classificados de acordo com o tipo de aquecimento, velocidade das partículas e taxa de deposição conforme a Tab. 2. O material denominado consumível pode ser aspergido em arames maciços, tubulares ou em forma de pó (Chattopadhyay, 2001).

No processo de aspersão a arco elétrico, os arames são aquecidos, fundidos e então são acelerados ao substrato utilizando gás comprimido. As partículas projetadas impactam sobre a superfície fria do substrato, achatando-se e formando placas finas, que aumentam a sobreposição de partículas, aderindo a irregularidades da superfície preparada e entre si, produzindo um revestimento de estrutura lamelar, não homogêneo e normalmente contendo um certo grau de porosidade e óxidos, no caso de aspersão metálica, Fig. 5b. O equipamento básico para este processo (Fig. 5a) consiste de uma fonte de corrente contínua do tipo tensão constante, alimentadores de arame com velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável.

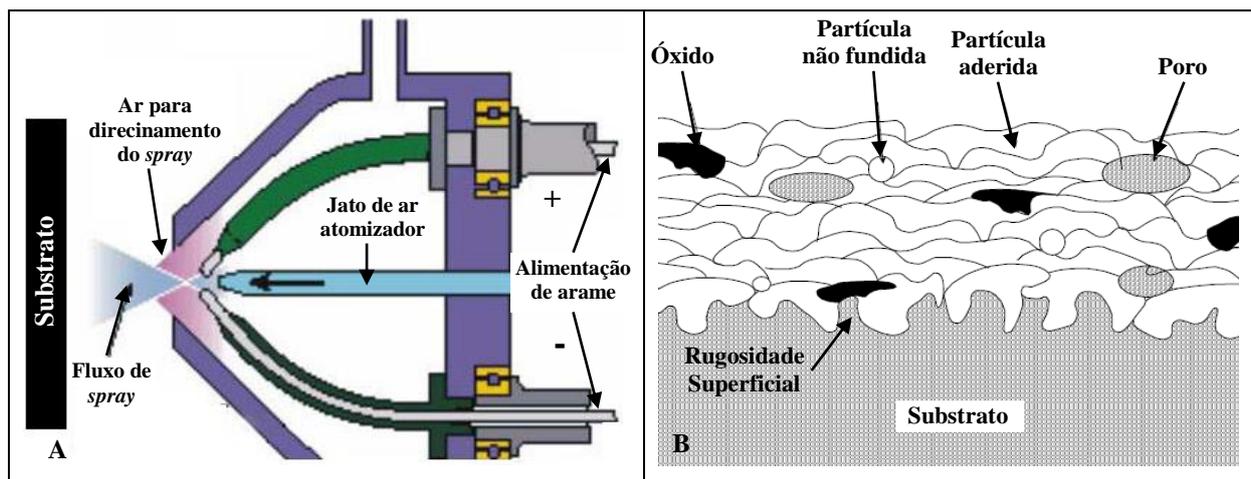


Figura 5 - (a) Processo de aspersão térmica a arco elétrico (adaptado Halldearn, 2009).

(b) Seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente (Marques, 2009).

As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Essas reações localizadas formam pequenas zonas soldadas levando a um revestimento com boa aderência. Um efeito negativo do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência a mudar a composição das ligas aplicadas, devido à oxidação durante a aspersão. Quando comparado ao processo à combustão, o revestimento por AS apresenta camadas mais densas e mais resistentes, baixo custo, alta taxa de deposição e eficiência, permitindo o revestimento de grandes áreas e alto volume de produção (Lima, 2001).

Tabela 2 - Características térmicas e velocidade das partículas aspergidas nos processos de aspersão térmica (Adaptado Chattopadhyay, 2001).

Tipo do Processo	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Taxa de deposição (kg/h)
Chama (<i>FS, Flame Spraying</i>)	3000	40	2-6
Arco (<i>AS, Arc Spraying</i>)	6000	100	12
Plasma (<i>PS, Plasma Spraying</i>)	12000	400-600	3-9
Hipersônica (<i>HVOF, High-Velocity Oxyfuel</i>)	3000	400-600	2-4
Detonação (<i>D-gun, Detonation gun</i>)	4500	800	2-4

2.3.1 Características dos Revestimentos

No que tange à porosidade dos revestimentos, estudos feitos com diferentes técnicas de deposição observaram que, independente da técnica utilizada, somente os revestimentos com baixa porosidade (menor que 5%) apresentam resistência ao desgaste erosivo. A resistência à erosão de revestimentos com porosidade maior que 5%, mesmo que tenham durezas similares - obtidas por diferentes técnicas de aspersão térmica, pode diferir em mais que uma ordem de grandeza em idênticas condições de desgaste (Kulu e Zimakov, 2000).

Levy e Wang (1988) investigaram 12 diferentes revestimentos cermets e relacionaram suas resistências à erosão ao mecanismo de desgaste de cada revestimento, onde o tamanho de grão, a porosidade e a presença de trincas formadas durante a deposição foram considerados fatores de significativa importância.

3. Procedimentos Metodológicos

Serão apresentados neste tópico os procedimentos utilizados para a realização do

trabalho, entre eles estão a confecção dos corpos de prova, os materiais empregados, processo de aspersão térmica, ensaio de desgaste erosivo, dentre outros.

3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova que receberam os revestimentos metálicos foram usinados em aço inoxidável AISI 304, conforme Fig. 6. O substrato não tem influência na caracterização dos revestimentos metálicos a que este trabalho propõe.

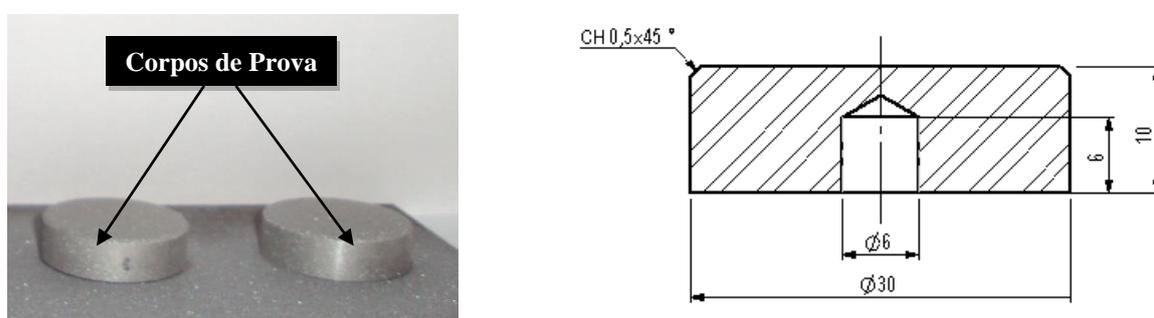


Figura 6 - Desenho esquemático e imagem do corpo de prova.

3.1.1 Preparação Superficial

No processo de aspersão térmica, a preparação superficial do substrato é de fundamental importância para a melhor aderência do revestimento ao substrato, ela consiste basicamente da limpeza e geometria da superfície (rugosidade).

Foi utilizado jateamento com óxido de alumínio marron (alumina eletrofundida) de forma angular, para a limpeza da superfície que recebe o revestimento metálico. O tamanho de grão do abrasivo é 24 mesh. Esse jateamento tem o objetivo de remover as impurezas da superfície, bem como desenvolver uma rugosidade que proporcione um melhor ancoramento mecânico do revestimento. Para a aspersão térmica a arco, uma rugosidade mínima de 6,0 Ra é recomendada.

O equipamento que foi utilizado para o jateamento abrasivo é do tipo Jato por Sucção, e realizado numa cabine enclausurada. A pressão utilizada para o jateamento foi de 4,0 - 5,0 bar, num bico de diâmetro de 4mm, a uma distância de 100 a 150mm. O jateamento foi

efetuado de forma manual, tentando assim manter uma angulação próxima a 90° entre a superfície do substrato e o fluxo de erodente.

Após a realização do jateamento abrasivo, iniciou-se as medições de rugosidade, com o auxílio de um rugosímetro digital SJ-201P - Mitutoyo. O valor salvo foi a média de 10 leituras em cada amostra, de acordo com a Tab. 3 a seguir.

Tabela 3 - Rugosidade das amostras

Amostra	Rugosidade Média Ra (μm)	Desvio Padrão (μm)
1B	7,08	$\pm 0,66$
2B	6,90	$\pm 0,66$
3B	6,86	$\pm 1,41$
1C	6,95	$\pm 0,80$
2C	7,42	$\pm 1,02$
3C	7,35	$\pm 1,88$
1D	7,01	$\pm 0,46$
2D	6,76	$\pm 0,69$
3D	6,72	$\pm 0,68$
1E	7,68	$\pm 0,85$
2E	7,93	$\pm 0,61$
3E	7,05	$\pm 1,35$

3.2 Aplicação dos Revestimentos Metálicos

Os revestimentos foram depositados por um equipamento de aspersão térmica a arco de marca EUTECTIC, denominado comercialmente de Eutronic ARC SPRAY 4. As aplicações dos revestimentos foram feitos no LAENS (Laboratório de Engenharia de Soldagem e Aspersão Térmica), da Faculdade SATC, com o auxílio de um sistema de aplicação automático por controle remoto como visto na Fig. 7b e 7c. A metalização foi realizada dentro de uma cabine enclausurada e com sistema de exaustão dos fumos gerados pelo processo conforme a Fig. 7a.

Os parâmetros de aspersão e a composição química para cada liga metálica utilizada para o revestimento dos corpos de prova estão apresentados nas Tab. 4 e 5, respectivamente. Todos os corpos de prova foram previamente metalizados com a liga A (NiAl), com o objetivo de melhorar a adesão dos revestimentos metálicos posteriormente depositados para avaliação de desempenho frente ao desgaste erosivo.



Figura 7 - (a) Cabine de aspersão; (b) Sistema de aplicação semi-automático; (c) Controle remoto de acionamento.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para a metalização dos corpos de prova.

Revestimento	Tensão (V)	Corrente (A)	Pressão (bar)	Distância da Tocha (mm)	Vel. de deslocamento da tocha (mm/min)
A – SM 8400	27,0	140	2,5	120	1074
B – 595 T	26,0	100	4,0	120	1074
C – SM 8297	28,0	100	4,0	120	1074
D – AISI 420	26,0	100	4,0	120	1074
E – Inconel 625	27,0	100	4,0	120	1074

Tabela 5 - Composição química nominal dos revestimentos.

Composição Química		
Revestimento	Fabricante	Percentual em Peso
A – SM 8400	Sulzer Metco	5% Al, bal. Ni.
B – 595 T	Eutectic	À base de FeCrB (composição não divulgada pelo fabricante).
C – SM 8297	Sulzer Metco	26% WC, 13% Cr, 6% TiC, 6% Ni, 2% B, 1% Si, bal. Fe
D – AISI 420	Sulzer Metco	13% Cr, 0.5% Ni, 0.5% Mn, 0,35% C, 0,25% Si, 0,06% Outros, bal. Fe
E – 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, 0.015% P

3.3 Caracterização dos Corpos de Prova

Nesta fase do trabalho, foi caracterizada a microestrutura de cada revestimento metálico, avaliando-se porosidade, microdureza e resistência ao desgaste erosivo.

3.3.1 Caracterização Microestrutural

Para a caracterização microestrutural, amostras de revestimentos depositados foram submetidas à preparação metalográfica convencional, sendo utilizados um microscópio Olympus BX51M e um microdurômetro Shimadzu HMV - 2TADW. A carga aplicada para a obtenção da indentação foi de 980,7 mN (HV 0,1), com tempo de 15 segundos. Para caracterização dos mecanismos remoção de material proveniente do ensaio de desgaste erosivo, foi empregada a técnica de microscopia eletrônica de varredura através de um equipamento Jeol – JSM – 6390.

3.3.2 Avaliação e Quantificação de Porosidade

A porosidade e o teor de óxidos dos revestimentos foram avaliados e determinados utilizando o método de análise de imagens computacional a partir de 10 imagens por revestimento através do software Olympus BX51M. Foi empregado a técnica de binarização manual, e o grau de porosidade na microestrutura foi determinado a partir da relação entre a área associada aos defeitos e a área total analisada.

3.3.3 Ensaio de Erosão Acelerada

O equipamento utilizado neste estudo atende à norma ASTM G76 - 95 *Standart Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets*, permitindo o ajuste das seguintes variáveis: temperatura do gás de arraste, bem como velocidade, fluxo e ângulo de impacto de erodente. Esse equipamento (Fig. 8) é constituído de quatro partes principais: 1) sistema de pré-aquecimento e secagem do gás de arraste; 2) sistema de alimentação dosada de partículas erosivas ; 3) sistema venturi - acelerador de partículas e 4) câmara de testes com sistema de aquecimento de até 1100°C.

Os ensaios de desgaste erosivo realizados neste trabalho foram feitos 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.



Figura 8 - Equipamento para ensaios de desgaste erosivo indicando as partes principais: (1) Pré-aquecimento do ar; (2) Sistema de alimentação das partículas erodentes; (3) Sistema venturi-acelerador de partículas; (4) Forno para os ensaios (LACER/UFRGS).

Em virtude da natureza conhecida dos materiais avaliados optou-se pela realização do ensaio de desgaste erosivo em ângulos de ataque de 30° e 90° , de forma a identificar os mecanismos predominantes de remoção de material, conforme os dados apresentados na Tab. 6. O tempo de exposição das amostras foi de 80 min por ensaio.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no ensaio de erosão.

Temperatura	370 °C
Fluxo de Massa	8,0 g/min
Velocidade	30 m/s
Ângulo de Impacto	30° e 90°
Erodente	Alumina Eletrofundida Marron
Tamanho do Erodente	160 μm
Acabamento Superficial	Lixa #600
Massa de Erodente por Teste	640g

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

4. Resultados e Análises

Neste trabalho foi avaliada a resistência a erosão por partículas sólidas de uma série de revestimentos aspergidos pelo processo a arco elétrico (AS), expostos a uma temperatura de ensaio de 370°C, e comparados com a resistência ao desgaste erosivo do material empregado nos tubos do trocador de calor ar/gases.

Na Tab. 7 são apresentados 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, e 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 7 - Propriedades dos Revestimentos

	Densidade Teórica (g/cm ³)	Porosidade (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)
ASTM A178	7,86	0,0	7,86
B – 595 T	6,74	2,8	6,55
C – SM 8297	8,85	11,5	7,84
D – AISI 420	7,70	2,1	7,54
E – Inconel 625	8,44	3,5	8,14

Com exceção do material "C", que apresentou 11,5% de porosidade, verifica-se que os demais revestimentos testados atendem ao critério de Kulu e Zimakov (2000), de tal forma que porosidades superiores a 5% inviabilizam a aplicação do revestimento para aplicações em desgaste erosivo. A Tab. 8 ilustra as amostras submetidas ao ensaio de desgaste erosivo. Os valores de taxa de erosão volumétrica, obtidas para cada revestimento em cada ângulo de impacto, bem como os valores de microdureza de cada uma das microestruturas analisadas estão apresentadas na Tab. 9.

Tabela 8 - Amostras pós-ensaio de erosão nos ângulos de incidência de 30° e 90°.

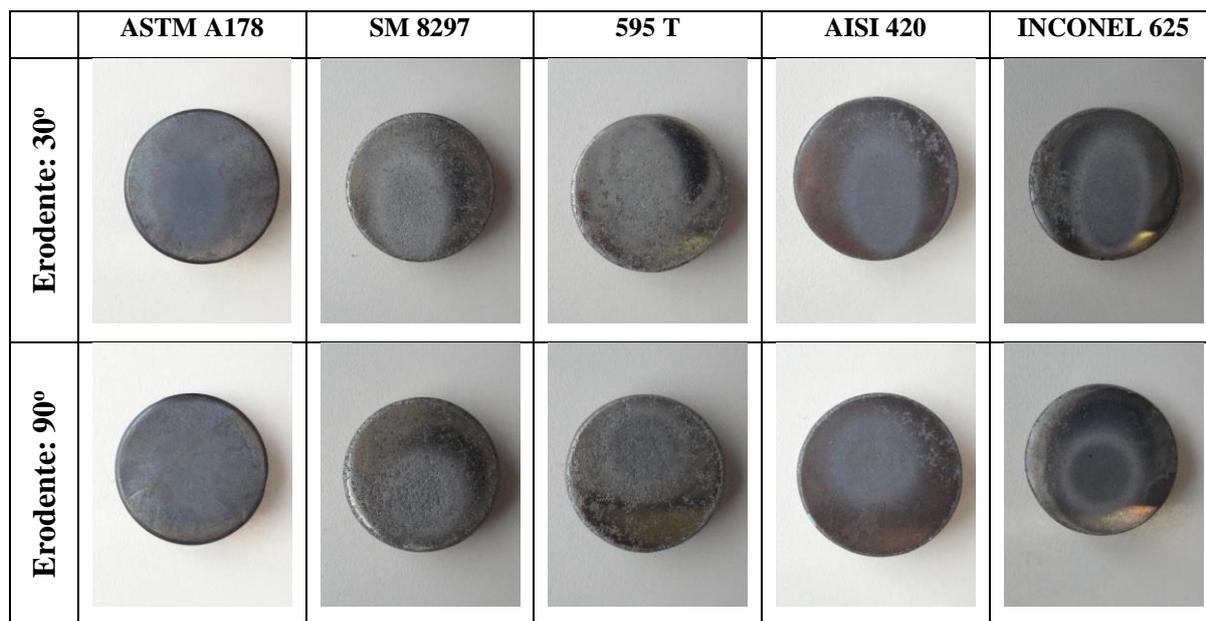


Tabela 9 - Resultados obtidos no teste de erosão por partículas sólidas.

Revestimento	Ângulo de Impacto	Taxa de erosão (cm ³ /g _{erodente}) * 10 ⁻⁶	Dureza (HV)
Aço ASTM A178	30°	2,226	130 ± 6
	90°	1,389	
B – 595 T	30°	4,129	900 ± 179
	90°	4,137	
C – SM 8297	30°	5,136	1044 ± 240
	90°	9,438	
D – AISI 420	30°	2,640	508 ± 85
	90°	2,868	
E – Inconel 625	30°	4,237	339 ± 37
	90°	4,045	

Pode ser observado na Fig. 9 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 se aproximou muito da resistência ao desgaste erosivo do aço ASTM A178 em ângulo de incidência de 30°, de acordo com dados históricos, existe uma maior intensidade e predominância do desgaste dos tubos dos trocadores nesse ângulo de incidência.

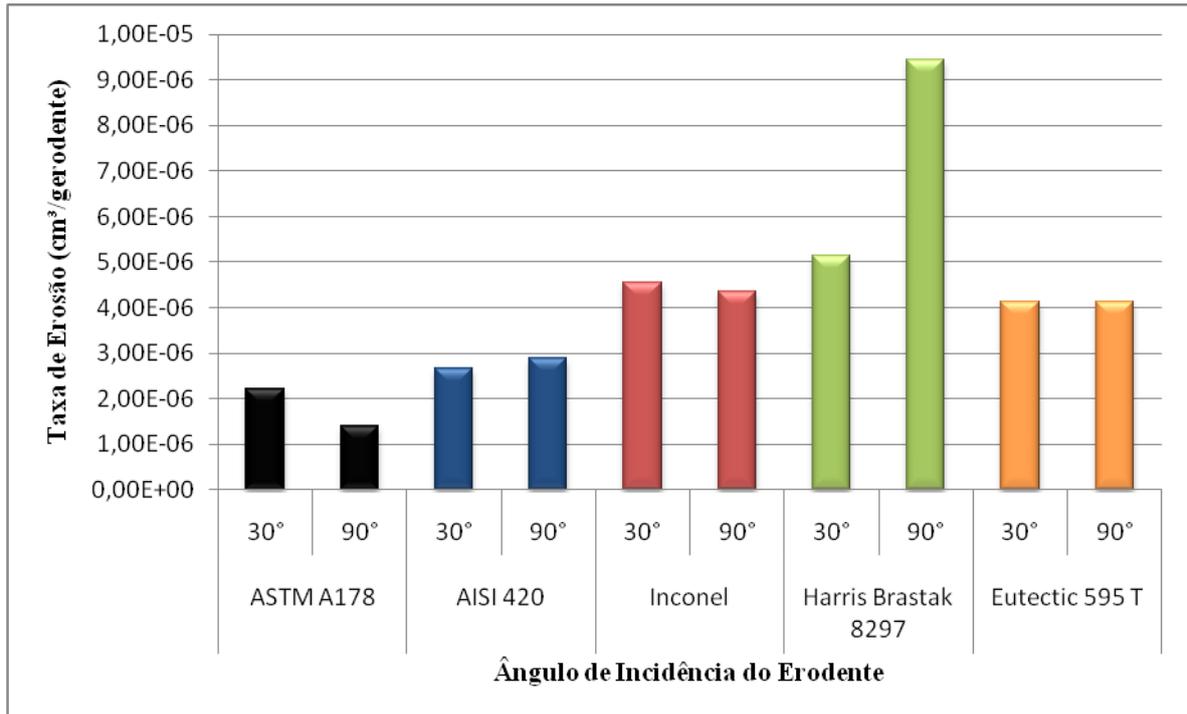


Figura 9 - Comparativo da taxa de erosão entre os revestimentos e o aço ASTM A178.

De uma forma geral, os resultados de taxa de erosão foram inesperados por dois motivos: 1) a dureza do aço ASTM A178 (130 HV) é inferior em relação àquela observada nos revestimentos aspergidos, os quais variam entre 339 HV a 1044 HV; e 2) as propriedades mecânicas dos revestimentos em alta temperatura são superiores a do aço. Aparentemente, os resultados mostraram que a dureza não deve ser um guia orientativo para a seleção do material em aplicações envolvendo desgaste erosivo.

No caso de revestimentos aspergidos, a porosidade apresenta importância fundamental sobre a resistência à erosão. A Fig. 10a demonstra que a taxa de erosão em ensaios de desgaste realizados com ângulo de incidência de erodente a 90° pode ser altamente correlacionada com o nível de porosidade encontrado no material analisado.

A Fig. 10b, apresenta um comparativo entre os ângulos de incidência de erodente a 30 e 90 graus. Pode ser observado, no caso do aço ASTM A178, que a taxa de remoção de material é mais acentuada em baixos ângulos de incidência (30°), caracterizando assim um mecanismo dúctil de desgaste erosivo. Por outro lado, a taxa de desgaste do revestimento SM 8297 (o qual possui alto nível de dureza) foi mais acentuada com ângulo de incidência de erodente a 90°, caracterizando como frágil o mecanismo de desgaste erosivo.

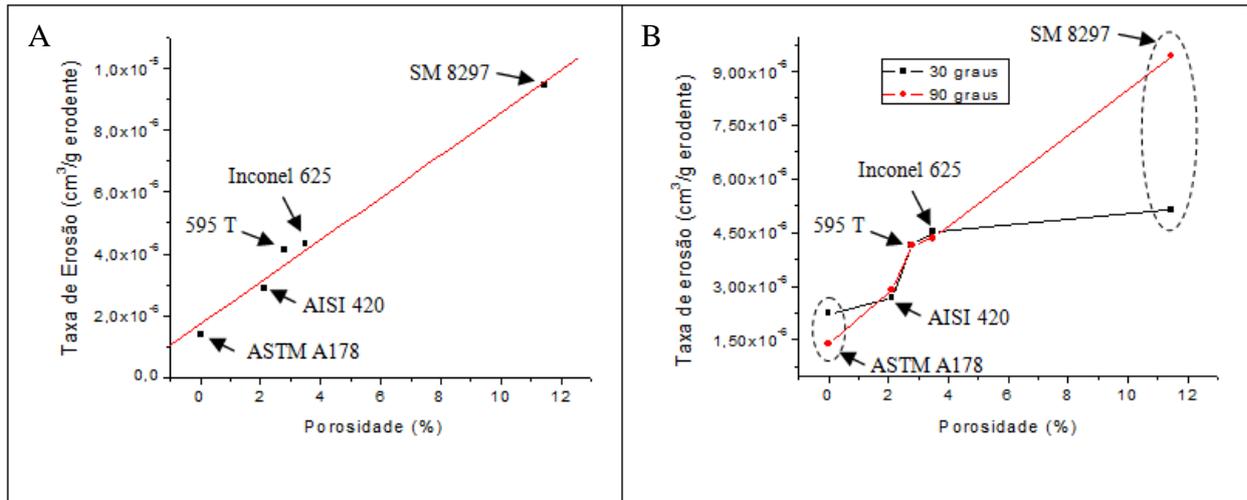


Figura 10 - Influência da porosidade contida sobre a taxa de erosão.

Uma alternativa para explicar a diferença no comportamento do desgaste nos revestimentos aplicados pelo processo de aspersão a arco pode estar evidenciado nas microestruturas e nos mecanismos de remoção de material durante o ensaio 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.

A Fig. 11, apresenta micrografias obtidas por microscopia ótica dos revestimentos depositados neste trabalho antes do processo de erosão. Verifica-se que os revestimentos depositados com AISI 420 e Inconel 625 apresentaram baixos níveis de porosidade, conforme reportado na Fig. 10.

Pode ser observado que no revestimento SM 8297 há a presença de uma alta densidade de microtrincas na seção transversal da camada aspergida, confirmando a característica de elevada fragilização deste material. Embora também esteja evidenciada a presença de microtrincas no revestimento 595T, a análise da taxa de erosão (Fig. 10) reportou um comportamento de perda de material semelhante nos dois ângulos de ensaio de desgaste (30° e 90°), caracterizando-o como um material de maior tenacidade em relação ao SM 8297.

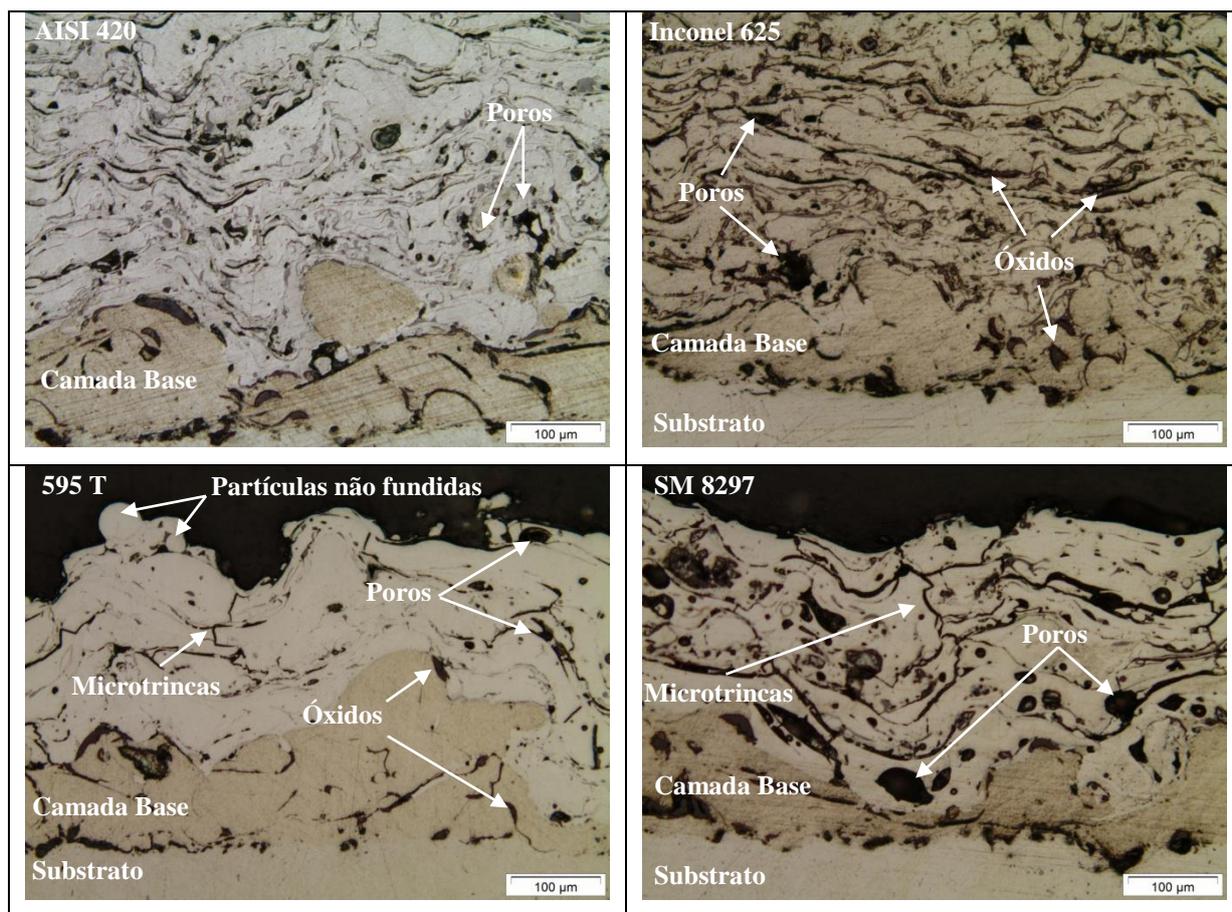


Figura 11 - Micrografias ópticas dos revestimentos aspergidos mostrando as microestruturas heterogêneas, aumento de 200x.

Um melhor entendimento dos mecanismos de remoção de material pode ser realizado a partir das análises das micrografias obtidas por MEV. A Fig. 12 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 (abrasão), com formação de lábios de cisalhamento. 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.

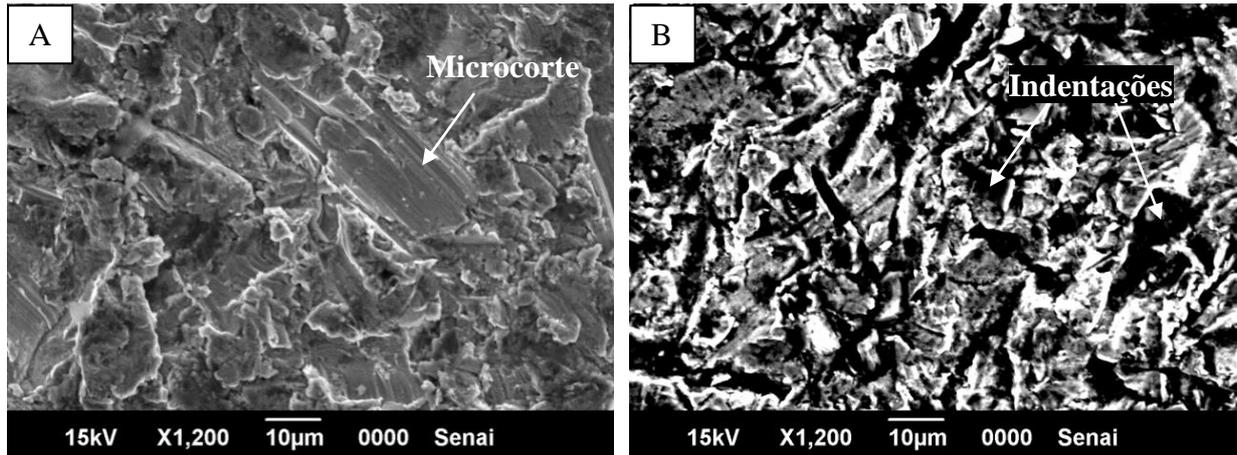


Figura 12 - Amostra do aço ASTM A 178 erodida a 30°A e 90°B.

Embora tenha sido constatada uma baixa perda de massa durante os ensaios de desgaste erosivo do aço ASTM A178, verificou-se duas possíveis fontes de incerteza no cálculo da taxa de erosão dos corpos de prova. A Fig. 13a 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) amostras desse material apresentaram um ganho de massa por oxidação da ordem de 2,6 mg (Fig. 13b).

Considerando que a perda de massa no C.P. ASTM A 178 erodido a 30° foi de 11,5 mg, enquanto que no C.P. revestido com aço inoxidável AISI 420 erodido a 30° foi de 12,8 mg, não existem 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.

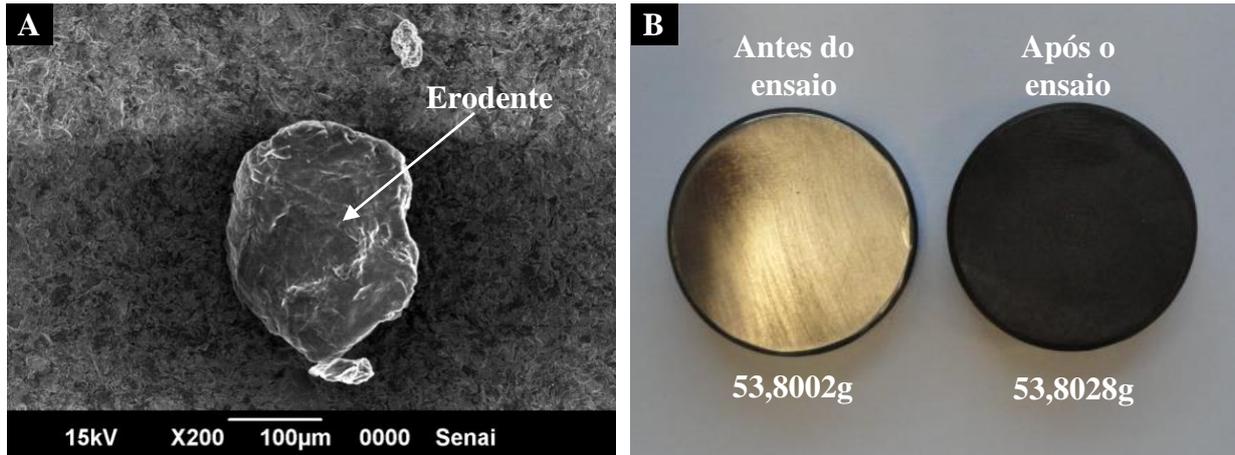


Figura 13 - (a) Incrustação de erodente no aço ASTM A178. (b) Ganho de massa por oxidação durante o ensaio em forno mufla.

A observação no MEV das amostras revestidas com o aço inoxidável AISI 420 e com a superliga a base de níquel Inconel 625 (Fig. 14) remetem para um mecanismo de remoção de material por erosão de forma predominantemente dúctil, de forma semelhante ao aço ASTM A 178. Com baixos ângulos de incidência de erodente (30°), observa-se evidências de microcorte em ambos os materiais AISI 420 e Inconel 625, conforme as Figuras 14a e 14c, respectivamente.

Adicionalmente, pode ser observada a formação de microcavacos em espiral na amostra revestida com Inconel erodida a 30° (Fig 14c), típico de materiais de elevada ductilidade. Observa-se também a ocorrência de remoção de material atribuída a eventos de corte em alto ângulo de ataque, que associado aos defeitos oriundos do processo de aspersão térmica podem estar aumentando a taxa de remoção de material em amostras dúcteis erodidas a 90° , equiparando aos valores de perda de material em baixo ângulo de desgaste (Fig. 9).

A Fig. 15 apresenta micrografias obtidas por MEV de revestimentos depositados com SM 8297 erodidas a 90° . A alta fragilidade deste material caracterizada pela presença de uma rede de trincas interligadas (previamente visualizadas por M.O. na Fig. 11), associada à alta quantidade de poros (superior a 10%) proporciona a obtenção de fratura por mecanismos de clivagem. Dessa forma, sugere-se que o fator preponderante para a elevada perda de massa nesse revestimento ocorra por lascamento de "camadas" de material.

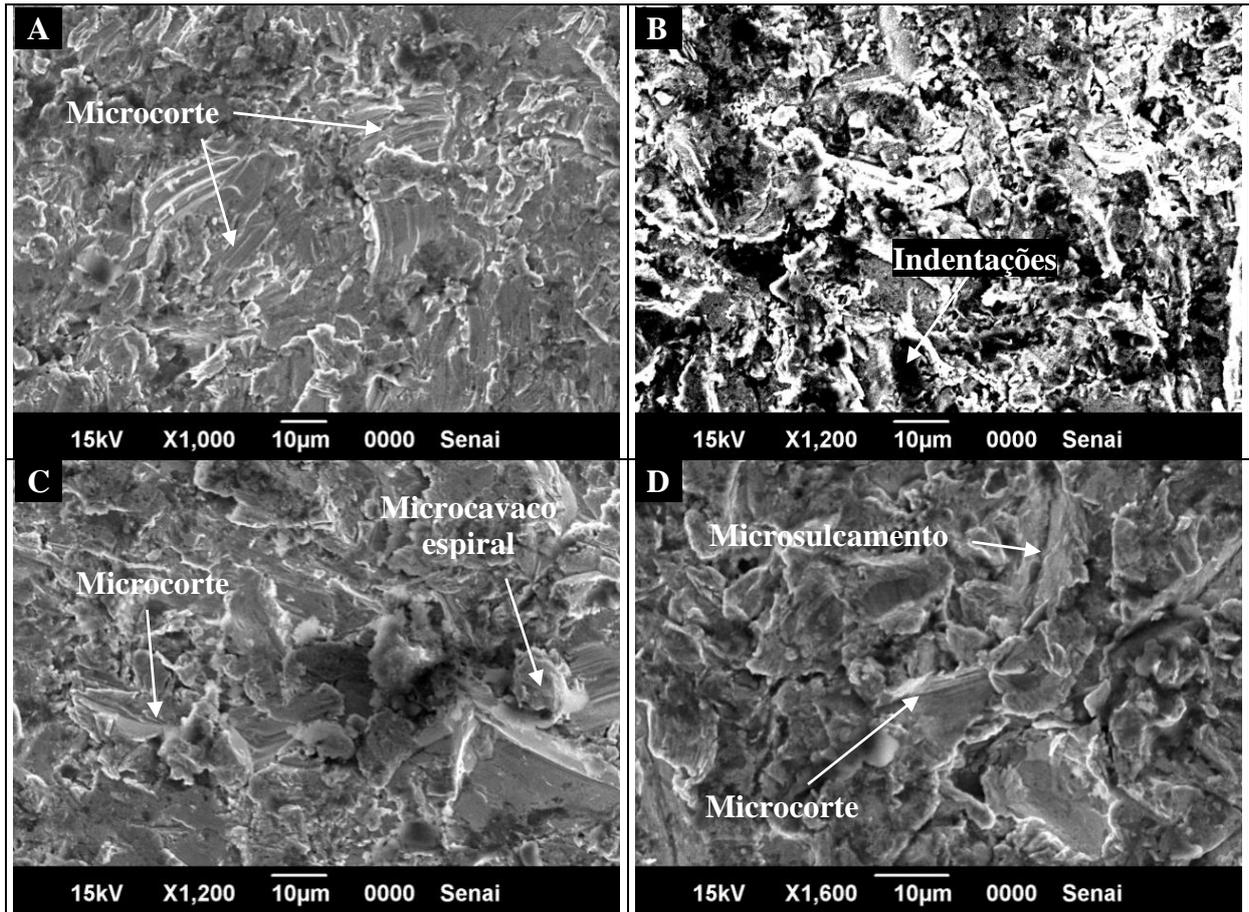


Figura 14 - (a) Revestimento com AISI 420 erodido a 30°. (b) Revestimento com AISI 420 erodido a 90°. (c) Revestimento com Inconel 625 erodido a 30°. (d) Revestimento com Inconel 625 erodido a 90°.

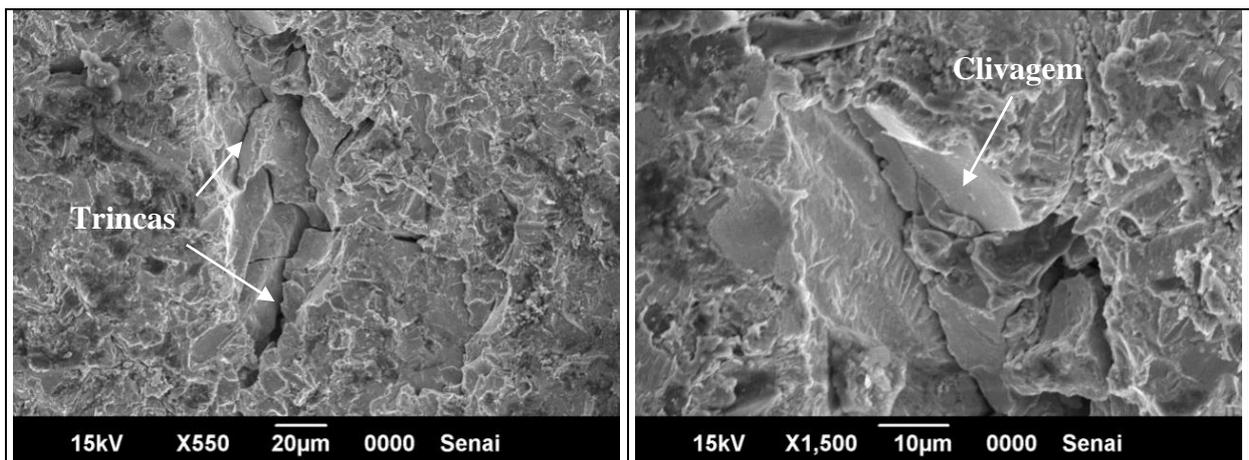


Figura 15 - Revestimento com SM 8297 erodido a 90°.

5. Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os revestimentos utilizados neste estudo apresentaram uma taxa de erosão volumétrica superior ou muito próxima a do aço ASTM A178.
- Existe uma incerteza nos valores obtidos no ensaio de erosão do aço ASTM A 178 em virtude dos eventuais 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 mecanismo de desgaste erosivo está diretamente associado ao ângulo de incidência do erodente e às propriedades mecânicas dos materiais envolvidos;
- A medida de dureza não deve ser utilizada como único critério de seleção de materiais para aplicações em desgaste erosivo;
- O revestimento SM 8297 apresentou o pior comportamento frente ao desgaste erosivo, em virtude de sua elevada dureza média (1044 HV), elevada densidade de microtrincas e 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 razoáveis (508 HV).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Sr. Franco Wronski Comeli e a TRACTEBEL ENERGIA pelo financiamento deste estudo por intermédio do projeto PD-0403-0012/2010. E a empresa RIJEZA Metalurgia pelo compartilhamento dos conhecimentos técnicos.

Bibliografia

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.

Buqian, W. e Luer, K. *The relative erosivity of limestone, dolomite and coal samples from an operating boiler*, Wear 215, 1998.

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, canada,1986.

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

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

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*. Wear, 1995.

Halldearn, R. *Arc thermal spray process*. Disponível em : <http://www.twi.co.uk>.

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

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

Levy, A. V.; Wang, B. Q. *Erosion of hard material coating systems*. Wear, v. 121,1988.

Levy, A.V., *Solid Particle Erosion And Erosion-Corrosion Of Materials*, Asm International, Materials Park, Ohio, USA, 1995.

Lima, C. *Aspersão térmica – fundamentos e aplicações*. São Paulo: Artliber Editora, 1ed. 2001.

Marques, P.V. *Aspersão Térmica – INFOSOLDA*. www.infosolda.com.br. 2009.

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

Silva, F. J.; *Erosão, Corrosão, Erosão-Corrosão e Cavitação do Aço ABNT 8550 Nitretado à Plasma*. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica. UFU – Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais. Uberlândia, 2008.

Wheeler, D. W., Wood, R. J. K., *Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves*. *Wear* 258, 2005.