

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2001



1110000454



***"Erosão em Revestimentos
Cerâmicos a Base de
Zircônia com Ítria"***

MARCELO JOSÉ BONDIOLI

145



EROSÃO EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS A BASE DE ZIRCÔNIA COM ÍTRIA

MARCELO JOSÉ BONDIOLI

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – Campus de Guaratinguetá
da Universidade Estadual Paulista, na
área de Projetos e Materiais, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

Co-orientador: Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto

Guaratinguetá

2001



454
—454

Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da
Informação da Biblioteca – FEG/UNESP

Bondioli, Marcelo José
B711e Erosão em revestimentos cerâmicos a base de zircônia
com ítria / Marcelo José Bondioli. –
Guaratinguetá, 2001.
99f.:il.; 30 cm

Bibliografia: f. 93 – 97
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001.
Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

1. Erosão I. Título

CDU 620.193.13 (043)

**“EROSÃO EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS
A BASE DE ZIRCÔNIA COM ÍTRIA”**

MARCELO JOSÉ BONDIOLI

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. SÉRGIO JOÃO CRNKOVIC
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Unesp-Feg



Prof.ª. Dr.ª. CECÍLIA AMÉLIA DE CARVALHO ZAVAGLIA
UNICAMP

Junho de 2001

DADOS CURRICULARES

MARCELO JOSÉ BONDIOLI

NASCIMENTO 05.05.72 – TAUBATÉ / SP

FILIAÇÃO José Benedicto Bondioli
Tereza Gomes Bondioli

1990/1996 Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica
Universidade de Taubaté - UNITAU



DEDICATÓRIA

Ao Prof. Dr. Sérgio João Unkelme pelo interesse, paciência, dedicação e confiança depositada na orientação deste trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Matemática e Estatística - FEG/UNESP, em especial ao Prof. Dr. Carlos de Menezes, Prof. Dr. Valdir A. Guimarães e Prof. Dr. Luis Augusto de O. Henri, pelo especial auxílio na elaboração deste trabalho.

A todos os funcionários e técnicos do Departamento de Matemática e Estatística - FEG/UNESP, por todos os auxílios na preparação deste trabalho.

Aos meus amigos: Lúcia R.P. Lima, Rita M.B. Jacaré e Claudiane Tadi da Faculdade de Engenharia Matemática da UNICAMP, pelo apoio e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

A Prof. Dra. Ana Rita de Azevedo e ao Prof. José Augusto Ribeiro, do Departamento de Engenharia Matemática da UNICAMP, pela ajuda na elaboração das partes de prova.

A todos os colegas da FEG/UNESP, e especialmente a Fabiano Carlos Borges e José Vinícius Fendilo, pelo companheirismo e amizade.

A CAPES, pelo auxílio financeiro recebido.

A Nossa Senhora Aparecida, padroeira do Brasil.

Aos meus pais, José e Tereza pelo amor, paciência e carinho e em especial aos meus avós, Rosa e Benedito (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic pelo incentivo, paciência, dedicação e confiança depositada na orientação deste trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Materiais e Tecnologia – FEG/UNESP, em especial ao Prof Dr. Tomaz M. Hashimoto, Prof. Dr. Valdir A. Guimarães e Prof. Dr. Luis Rogerio de O. Hein, pelo especial auxílio na execução deste trabalho.

A todos os funcionários e técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia – FEG/UNESP, por toda a ajuda na preparação deste trabalho.

Aos técnicos Carmo R.P. Lima, Rita H.B. Jacon e Claudenete Leal da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, pela preparação dos revestimentos e por toda a ajuda nas microscopias ótica e eletrônica de varredura.

A Profª. Dra. Ana Paula Rosifini Alves e ao técnico José Arauto Ribeiro, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU pela ajuda no seccionamento dos corpos de prova.

A todos colegas da FEG/UNESP, e especialmente a Roberto Cursino Koga e José Victor Candido, pelo companheirismo e amizade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.



SOMÁRIO

Índice da obra	01
Índice de apostrofo	02
Dados curriculares	03
Dedicação	04
Agradecimento	05
Apelo Brasileiro	06
Epígrafe	06
Sinopse	07
Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	12
Lista de Abreviaturas e Siglas	13
Resumo	17
Abstract	18

“Sem esforço de nossa parte, jamais atingiremos o alto da montanha. Não desanime no meio da estrada: siga à frente, porque os horizontes se tornarão amplos e maravilhosos à medida que for subindo. Mas não se iluda, pois só atingirá o cimo da montanha se estiver decidido a enfrentar o esforço da caminhada.”

C. Torres Pastorino, Minutos de Sabedoria

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

1.2 Objetivos e Justificativa

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fundamentação Teórica

2.1.1 Introdução

2.1.2 Processo de Desenvolvimento

2.1.3 Metodologia de Desenvolvimento

2.1.4 Implantação do Substituto no Japão: Os Resultados

2.1.5 Outros Resultados

2.2 Degradação Ambiental no Desenvolvimento Sustentável

2.2.1 Introdução

SUMÁRIO

Folha de rosto.....	01
Folha de aprovação.....	02
Dados curriculares.....	03
Dedicatória.....	04
Agradecimento.....	05
Apoio financeiro.....	05
Epígrafe.....	06
Sumário.....	07
Lista de figuras.....	11
Lista de tabelas.....	15
Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	16
Resumo.....	17
Abstract.....	18
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Considerações Iniciais.....	19
1.2 Objetivos e Justificativa.....	22
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1 Processo de Aspersão Térmica a Plasma	24
2.1.1 Introdução.....	24
2.1.2 Processo de Deposição.....	25
2.1.3 Microestrutura do Revestimento.....	27
2.1.4 Influências do substrato na deposição do revestimento.....	30
2.1.5 Defeitos Microestruturais.....	32
2.2 Desgaste Erosivo em Revestimentos Cerâmicos.....	34
2.2.1 Introdução.....	34

2.2.2 Influência do ângulo de impacto no comportamento erosivo.....	35
2.2.3 Influência da estrutura dos revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma no mecanismo de desgaste de processos erosivos por fluxo aquoso.....	39
2.2.4 Influência da velocidade de impacto do fluxo aquoso e das partículas erodentes na taxa de erosão de revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma.....	41
2.2.5 Influência da dureza do revestimento cerâmico por aspersão térmica a plasma na taxa de erosão.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 Materiais.....	43
3.1.1 Pós de Revestimento.....	43
3.1.2 Substratos.....	43
3.1.3 Areia.....	44
3.2 Equipamentos Utilizados.....	45
3.2.1 Equipamento de aspersão térmica a plasma.....	45
3.2.2 Equipamento de Ensaio de Erosão.....	46
3.2.3 Microscopia Óptica.....	46
3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	47
3.2.5 Metalização.....	47
3.2.6 Microdureza Vickers.....	47
3.2.7 Rugosímetro.....	47
3.2.8 Balança.....	48
3.2.9 Seccionamento dos corpos de prova.....	48
3.3 Parâmetros do Ensaio.....	48
3.3.1 Parâmetros utilizados no revestimento do substrato.....	48
3.3.2 Parâmetros utilizados nos ensaios de erosão.....	49
3.4 Metodologia Aplicada.....	49

3.4.1 Metodologia aplicada na preparação dos substratos.....	49
3.4.2 Metodologia aplicada na deposição da camada intermediária e do revestimento no substrato.....	50
3.4.3 Metodologia aplicada aos ensaios de erosão.....	50
3.4.4 Metodologia aplicada na determinação da taxa de erosão.....	51
3.4.5 Metodologia aplicada na preparação das amostras para a microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.....	51
3.4.6 Metodologia aplicada nos ensaios de microdureza.....	52
3.4.7 Metodologia aplicada na microanálise das amostras.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 Resultados da rugosidade superficial dos corpos de prova antes da deposição do revestimento cerâmico e da camada intermediária.....	54
4.2 Resultado da microanálise nas secções transversais das crateras de erosão.....	54
4.2.1 Revestimento cerâmico em substrato de aço.....	54
4.2.2 Revestimento cerâmico em substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo.....	55
4.2.3 Revestimento cerâmico em substrato de latão.....	57
4.2.4 Revestimento cerâmico em substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo.....	58
4.3 Resultado dos ensaios de erosão.....	60
4.4 Resultados da microdureza na secção transversal da cratera de erosão para um ângulo de impacto de 90°.....	66
4.4.1 Microdureza medida nos substratos de aço e latão.....	66
4.4.2 Microdureza medida nos substratos, nos quais foram depositados a camada intermediária de níquel-cromo.....	68
4.5 Resultados da Microscopia Óptica.....	72
4.6 Resultado das Microscopias Eletrônicas de Varredura.....	76

4.6.1 Microscopias eletrônicas de varredura da superfície do revestimento cerâmico.....	76
4.6.2 Microscopias eletrônicas de varredura das secções transversais das crateras de erosão.....	82
4.7 Considerações gerais.....	85
5 CONCLUSÕES.....	90
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Diagrama de causa e efeito de um processo genérico de erosão por partículas sólidas.....	20
FIGURA 2.1 – Diagrama esquemático da pistola de aspersão de plasma.....	24
FIGURA 2.2 – Diagrama esquemático da partícula atingindo o substrato.....	26
FIGURA 2.3 – Tensões atuantes durante o processo de expansão e solidificação, entre o substrato e o revestimento.....	27
FIGURA 2.4 – Secção transversal de um deposito por aspersão térmica – a uma passada da pistola de aspersão.....	28
FIGURA 2.5 – Esquema da secção transversal, em que mostra a formação e a microestrutura dos revestimentos por aspersão térmica.....	29
FIGURA 2.6 – Diferença entre as lamelas em função da temperatura do substrato.....	31
FIGURA 2.7 – Representação do ângulo de impacto do fluxo sobre a superfície atingida.....	35
FIGURA 2.8 – Influência do ângulo de impacto sobre a erosão em meio gasoso.....	36
FIGURA 2.9 – Tipos de comportamento da taxa de erosão por partícula sólida em meio aquoso em função do ângulo de impacto, para metais dúcteis.....	37
FIGURA 2.10 – Efeito do ângulo de impacto na taxa de erosão por pasta aquosa de material frágil (vidro).....	38
FIGURA 2.11 – Modo de falha de um revestimento cerâmico por aspersão térmica de plasma no desgaste erosivo.....	40
FIGURA 3.1 – Representação esquemática do aparelho de erosão por	

partículas sólidas em meio aquoso.....	46
FIGURA 3.2 – Secção transversal do corpo de prova.....	52
FIGURA 4.1 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento cerâmico depositado em aço, indicando os pontos em que foram feitas as microanálises.....	55
FIGURA 4.2 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento cerâmico depositado em aço com a camada intermediária, indicando os pontos em que foram feitas as microanálises.....	56
FIGURA 4.3 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento cerâmico depositado em latão, indicando os pontos em que foram feitas as microanálises.....	57
FIGURA 4.4 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento cerâmico depositado em latão com a camada intermediária, indicando os pontos em que foram feitas as microanálises.....	59
FIGURA 4.5 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de aço e substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.....	61
FIGURA 4.6 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de aço e substrato de latão, com nível de confiança de 95%.....	62

FIGURA 4.7 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de aço e substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.....	62
FIGURA 4.8 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de aço com a camada intermediária de níquel cromo e substrato de latão, com nível de confiança de 95%.....	63
FIGURA 4.9 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo e substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.....	63
FIGURA 4.10 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em substrato de latão e substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.....	64
FIGURA 4.11 – Resultado das medições de microdureza (Hv) efetuadas na secção transversal da cratera de erosão, no substrato de aço SAE 1010, com nível de confiança de 95%.....	67
FIGURA 4.12 – Resultado das medições de microdureza (Hv) efetuadas na secção transversal da cratera de erosão, no substrato de latão, com nível de confiança de 95%.....	68
FIGURA 4.13 – Resultado das medições de microdureza (Hv) efetuadas na secção transversal da cratera de erosão, na camada intermediária e no substrato de aço SAE 1010, com nível de confiança de 95%.....	70
FIGURA 4.14 – Resultado das medições de microdureza (Hv) efetuadas na secção transversal da cratera de erosão, na camada	

intermediária e no substrato de latão, com nível de confiança de 95%.....	71
FIGURA 4.15 – Detalhe da secção transversal do revestimento cerâmico depositado sobre substrato de aço e sobre substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo.....	72
FIGURA 4.16 – Detalhe da secção transversal do revestimento cerâmico depositado sobre substrato de latão e sobre substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo.....	74
FIGURA 4.17 – Superfície do revestimento em função do substrato....	76
FIGURA 4.18 – Detalhe da superfície do revestimento em função do substrato.....	77
FIGURA 4.19 – Superfície da cratera de erosão do revestimento em função do substrato.....	79
FIGURA 4.20 – Detalhe da Superfície da cratera de erosão do revestimento em função do substrato.....	80
FIGURA 4.21 – Superfície erodida do revestimento cerâmico depositado em substrato de aço em função do ângulo de impacto.....	81
FIGURA 4.22 – Secções transversais dos revestimentos, em função do substrato.....	82
FIGURA 4.23 – Detalhe da secção transversal da cratera de erosão dos revestimentos depositados em substratos de aço e latão....	83
FIGURA 4.24 - Detalhe da secção transversal da cratera de erosão dos revestimentos depositados em substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo.....	83
FIGURA 4.25 - Detalhe da secção transversal da cratera de erosão dos revestimentos depositados em substratos de latão com a camada intermediária de níquel-cromo.....	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Composição química e propriedades mecânicas do substrato de aço SAE 1010.....	44
TABELA 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas do substrato de latão.....	44
TABELA 3.3 – Parâmetros envolvidos na deposição do revestimento cerâmico.....	49
TABELA 4.1 – Resultado da microanálise efetuada na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado no substrato de aço.....	55
TABELA 4.2 - Resultado da microanálise efetuada na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado no substrato de aço com a camada intermediária.....	56
TABELA 4.3 - Resultado da microanálise efetuada na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado no substrato de latão.....	58
TABELA 4.4 - Resultado da microanálise efetuada na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado no substrato de latão com a camada intermediária.....	59
TABELA 4.5 – Taxa volumétrica de erosão dos revestimentos cerâmicos, em função do substrato e do ângulo de impacto, com nível de confiança de 95%.....	60
TABELA 4.6 – Resultados das microdurezas medidas nos substratos de aço e de latão, com nível de confiança de 95%.....	67
TABELA 4.7 - Resultados das microdurezas medidas nas camadas intermediárias e nos substratos de aço e de latão, com nível de confiança de 95%.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

H_v	Dureza Vickers
R_a	Rugosidade média
R_y	Rugosidade máxima
SAE	“Society of Automotive Engineers”
θ	Ângulo de Impacto do Fluxo
v	Velocidade de Impacto do fluxo



BONDIOLI, M.J. *Erosão em revestimentos cerâmicos a base de zircônia com ítria*. Guaratinguetá, 2001, 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

RESUMO

Os revestimentos cerâmicos aplicados por diversos processos de deposição em componentes mecânicos, além de possuírem boas combinações de dureza, resistência ao desgaste e ao calor, estabilidade e inércia química, demonstram aumentar a resistência a erosão por pasta aquosa em relação aos materiais metálicos utilizados, em baixos ângulos de impacto. Utilizando-se um aparelho de ensaio de erosão por partícula sólida do tipo jato de impacto, foram efetuados ensaios de erosão em revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria depositados por aspersão térmica a plasma sobre substratos de aço SAE 1010 e de latão e sobre uma camada intermediária de níquel-cromo previamente depositada por aspersão térmica a plasma em substratos de aço e latão. Os resultados quantitativos da taxa de erosão mostram um melhor desempenho dos revestimentos cerâmicos depositado sobre substrato de latão, sendo que este fato relaciona-se a uma maior deformação plástica do substrato de aço, próximo a interface do revestimento. A camada intermediária de níquel-cromo, apesar de melhorar a adesão entre o revestimento e o substrato apresentou o efeito de aumentar a taxa média de erosão. A análise por microscopia eletrônica de varredura das superfícies desgastadas indicou que os mecanismos de desgaste ocorrentes foram a fratura e/ou a remoção das lamelas.

Palavras chave: desgaste; erosão por partículas sólidas em meio aquoso; revestimentos cerâmicos; aspersão térmica



BONDIOLI, M.J. Erosion in zirconia with yttria ceramic coatings. Guaratinguetá, 2001, 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

ABSTRACT

The ceramic coatings, applied by several processes of deposition in mechanical parts, have good combinations of hardness, wear, heat resistance and chemical stability and inertia. Moreover, at low impact angles, the tests demonstrate that ceramic coatings deposited in metallic materials increase the slurry erosion resistance compared to when the metallic materials are used alone. Using an aqueous slurry erosion jet tester were performed erosion tests in zirconia - 8%wt yttria ceramic coating applied by plasma thermal-spray on SAE 1010 steel and brass substrates and also on an nickel-chromium bond coating previously applied by plasma thermal-spray on SAE 1010 steel and brass substrates. The obtained quantitative results of erosion rate showed a better performance for ceramic coating deposited on brass substrate, owing to a bigger plastic deformation find in the steel substrate near the coating interface. The nickel-chromium bond coating, instead of improving the adhesion between the coating and the substrate, caused the increasing of the erosion mean rate. The analysis by SEM of the worn surfaces indicated that the wear mechanisms were basically the cracking and/or chipping.

KEYWORDS: wear; aqueous slurry erosion; ceramic coatings; thermal spray

1 INTRODUÇÃO.

1.1 Considerações Iniciais.

Devido ao desenvolvimento contínuo dos diversos setores da indústria, os materiais estão cada vez mais sujeitos a ambientes de trabalho e condições de uso que podem levá-los ao desgaste, que pode ser definido como o dano de uma superfície sólida envolvendo a perda imediata ou progressiva de material desta superfície, devido ao movimento relativo entre ela e outros materiais em contato (Blau, 1995).

O processo de desgaste denominado erosão ocorre quando o impacto de fluxos gasosos ou líquidos com partículas sólidas em altas velocidades, produzem a remoção de material da superfície por repetidos impactos das partículas (Lathabai *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 1995). O processo de erosão contribui com 8% de todo o desgaste que ocorre (Xia *et al.*, 1999) e tem limitado a vida de muitos componentes mecânicos, tais como: pás de bombas, válvulas, tubos de transporte, hidrociclones, no transporte de minerais em indústrias de mineração, entre outros (Lathabai *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 1995 e Fang *et al.*, 1999).

A figura 1.1, ilustra o diagrama de causa e efeito para um processo genérico de erosão por partículas sólidas.

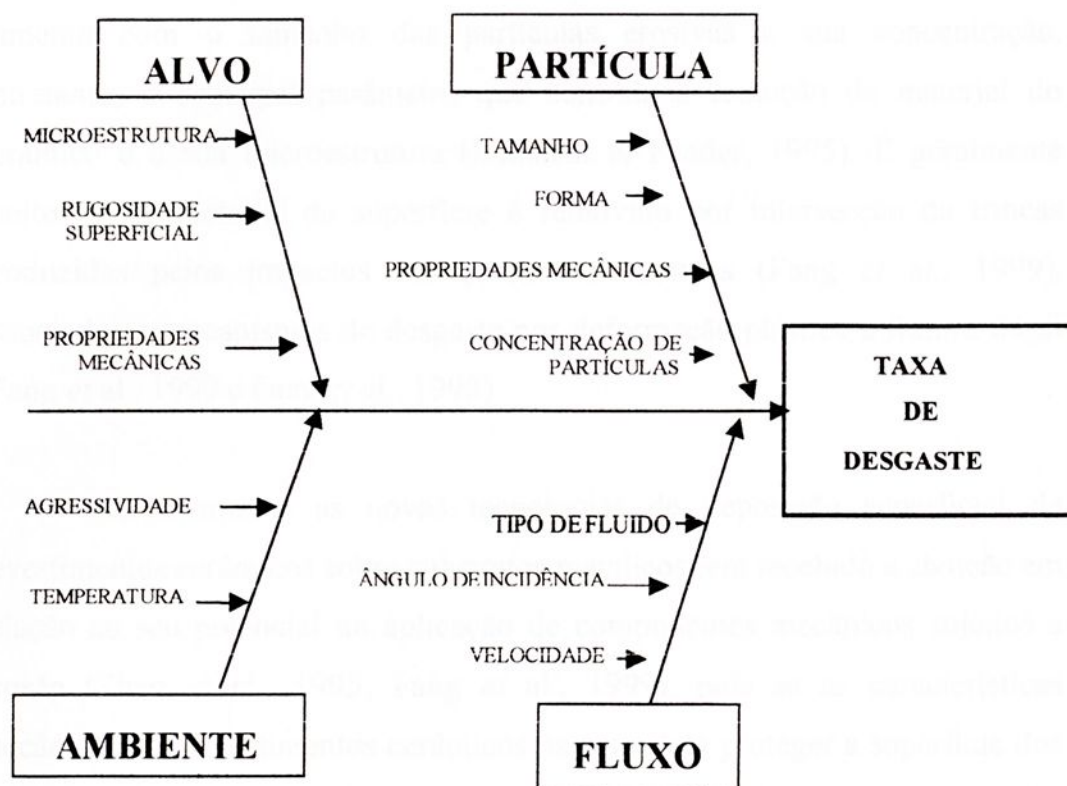


FIGURA 1.1 – Diagrama de causa e efeito de um processo genérico de erosão por partículas sólidas (Abbade, 1999).

Há, portanto, uma demanda industrial para materiais adequados que resistam com eficiência a erosão por partícula sólida em meio líquido (Fang *et al.*, 1998) e os materiais cerâmicos são atrativas opções devido a sua combinação de propriedades, tais como: dureza, alta temperatura de fusão e alto nível de inércia química (Zhao *et al.*, 1995; Fang *et al.*, 1999; Fang *et al.*, 1998; Lathabai *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 1999). Avanços no entendimento do comportamento a erosão e dos mecanismos de erosivos dos materiais cerâmicos tem sido feitos recentemente, entretanto, o entendimento em meio líquido não se encontra bem esclarecido (Fang *et al.*, 1999). Em relação aos parâmetros importantes no desgaste erosivo, tem sido observado o aumento linear do volume removido com o tempo de erosão (Lathabai *et Pender*, 1995 e Fang *et al.*, 1999), um aumento da taxa de desgaste com o aumento do ângulo de impacto do fluxo (Lathabai *et Pender*, 1995 e Zhao *et al.*, 1999), um

aumento com o tamanho das partículas erosivas e sua concentração, entretanto, o principal parâmetro que controla a remoção de material do cerâmico é a sua microestrutura (Lathabai *et al.*, 1995). É geralmente aceito que o material da superfície é removido por intersecção de trincas produzidas pelos impactos das partículas erosivas (Fang *et al.*, 1999), associados a mecanismos de desgaste por deformação plástica e fratura frágil (Fang *et al.*, 1999 e Fang *et al.*, 1998).

Recentemente, as novas tecnologias de deposição superficial de revestimentos cerâmicos sobre substratos metálicos tem recebido a atenção em relação ao seu potencial na aplicação de componentes mecânicos sujeitos a erosão (Zhao *et al.*, 1995; Fang *et al.*, 1999), pois se as características mecânicas dos revestimentos cerâmicos os permitem proteger a superfície dos substratos dos efeitos do desgaste, e os substratos metálicos apresentam alta tenacidade, desta forma, os pontos fracos dos materiais metálicos e dos cerâmicos depositados são compensados (Zhao *et al.*, 1999b). Entretanto, os métodos de deposição superficial tem apresentado problemas relativos a fraca adesão das camadas depositadas aos substratos, devido às grandes diferenças nos coeficientes de expansão térmica (Zhao *et al.*, 1995; Lathabai *et al.*, 1998).

Entre os processos de deposição de revestimentos superficiais, os revestimentos cerâmicos depositados por Aspersão Térmica a Plasma em substratos de ligas metálicas têm tornado objeto de crescente interesse e uma solução propícia para muitos problemas e aplicações industriais, sendo que a performance final do revestimento depende sensivelmente da escolha do material do substrato, assim como do próprio material cerâmico, e das variáveis que controlam o processo de aspersão térmica (Ding *et al.*, 1993)

O uso de revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma, não restringe-se apenas às aplicações industriais, mas também em aplicações

estruturais e em peças de equipamentos. Outra função apresentada pelos revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma é a de reduzir a temperatura do metal base. Este tipo de revestimento é conhecido como “revestimentos de barreira térmica”, sendo utilizado principalmente na indústria aeronáutica e em motores a combustão, pois apresentam um pequeno volume percentual de porosidade, contribuindo favoravelmente para uma diminuição na condutividade térmica (Westergard *et al.*, 1998; Gordon, 1999 e Zhao *et al.*, 1999b).

A microestrutura lamelar produzida pelo processo de deposição de cerâmico por aspersão térmica a plasma é altamente defeituosa com interfaces fracas e vazios entre lamelas, material incidente não fundido e trincas (Lathabai *et al.*, 1998 e Zhao *et al.*, 1999). A utilização de pré revestimentos adequados sobre o substrato (camada intermediária) demonstrou uma melhora na adesão do revestimento cerâmico (Zhao *et al.*, 1999).

A técnica de aspersão térmica a plasma utilizada neste trabalho foi controlada manualmente, e desta maneira não foi possível fixar alguns parâmetros, como a velocidade transversal da pistola de aspersão e a distância entre ela e o superfície do substrato, levando a problemas como a não homogeneidade do depósito em relação à espessura e estrutura, conforme relatado por Gordon (1999).

1.2 Objetivos e Justificativa.

Em vista do processo de erosão do material em estudo estar relacionado ao impacto das partículas sólidas no fluxo aquoso sobre a superfície e portanto sujeito a mecanismo de fratura e/ou remoção de suas lamelas superficiais, este trabalho de pesquisa tem por objetivo, analisar a

erosão por partículas sólidas em meio aquoso do revestimento cerâmico por aspersão térmica a plasma à base de zircônia-8% ítria em relação a:

- 1. Influência do substrato de aço e de latão sobre a erosão do revestimento cerâmico de zircônia – 8% ítria em ângulos de impacto do fluxo aquoso de 30° e 90°;
- 2. Influência do substrato com camada intermediária de níquel-cromo sobre a erosão do revestimento cerâmico de zircônia – 8% ítria em ângulos de impacto do fluxo aquoso de 30° e 90°.

Não esquecer de separar a energia e plasma, materiais de revestimento na forma de pó são aplicados em uma câmara de plasma e uma velocidade muito alta, na qual são aquecidos, podendo fundir imediatamente e aderir em alta velocidade devido ao movimento de rotação constante. Deixa a figura 2.1 para explicar a aplicação de materiais que se deseja erosionar.



FIGURA 2.1 - Diagrama Esquemático de Planta de Aspersão de Plasma (American Welding Society, 1983)

A planta de aspersão térmica a plasma é composta de um forno de arco e uma câmara de revestimento, ambos rotacionados à alta velocidade. O pó é aplicado em direção ao substrato em alta velocidade e o substrato é rotacionado para garantir a aplicação uniforme. O processo de aplicação de plasma é

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo De Aspersão Térmica Por Plasma.

2.1 1 Introdução.

No processo de aspersão térmica a plasma, materiais de revestimento na forma de pós são injetados em uma chama de plasma a uma temperatura muito alta, na qual são aquecidos, podendo fundir-se totalmente, e acelerados em altas velocidades através de uma pistola de aspersão, conforme ilustra a figura 2.1, até atingir a superfície do substrato que se deseja revestir.

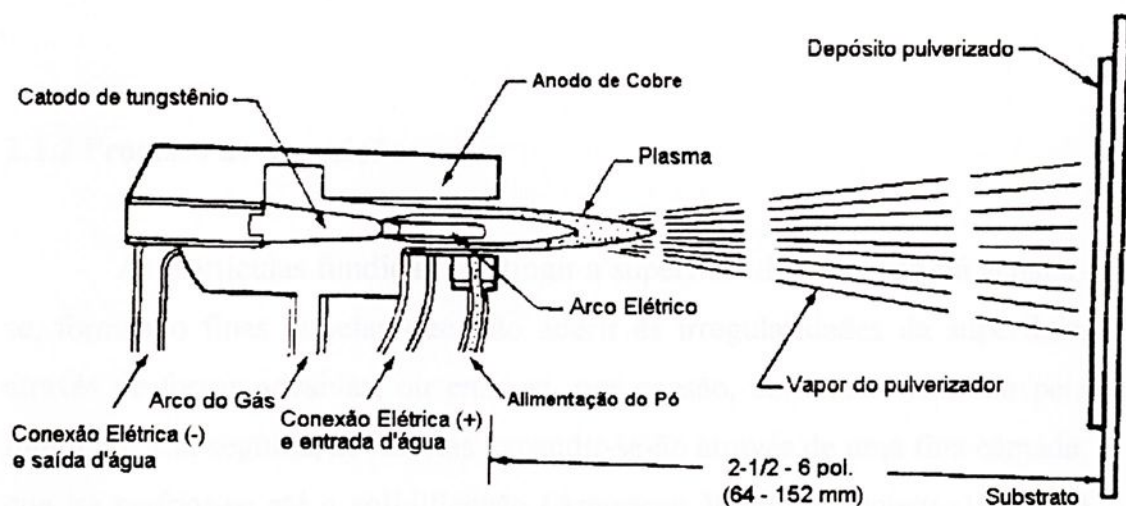


FIGURA 2.1 - Diagrama Esquemático da Pistola de Aspersão de Plasma (American Welding Society, 1985).

A pistola de aspersão térmica a plasma é composta de um ânodo de cobre e um cátodo de tungstênio, ambos resfriados à água. Gases como o argônio, nitrogênio, hidrogênio ou hélio fluem através e ao redor do cátodo que tem a forma de um bocal. O processo de formação do plasma é

inicializado por uma descarga de alta voltagem, causando uma ionização dos gases, que origina um arco elétrico entre o cátodo e o ânodo. O gás, aquecido pelo arco elétrico, alcança temperaturas extremas, dissociando-se e ionizando-se, até formar o plasma. O plasma deixa o bocal como uma chama livre ou neutra (não condutora de eletricidade). A alimentação do pó na chama de plasma realiza-se próximo da saída do bocal do ânodo, sendo rapidamente aquecido e acelerado. A distância entre a saída do bocal e a superfície à ser pulverizada deve estar em torno de 75 a 150 mm (American Welding Society, 1985).

O processo de aspersão térmica a plasma tem a vantagem de depositar materiais com pontos de fusão muito altos, como materiais refratários (tungstênio, por ex.) e cerâmicos (zircônia, por ex.) sem que estes materiais sofram decomposição.

2.1.2 Processo de deposição.

As partículas fundidas ao atingir a superfície do substrato irá achatar-se, formando finas lamelas que irão aderir às irregularidades da superfície, através de forças adesivas, ou entre si, por coesão, conforme ilustrado pela figura 2.2. Em seguida, as lamelas expandir-se-ão através de uma fina camada, que irá resfriar-se até a solidificação (American Welding Society, 1985). O processo de expansão é dependente da velocidade na qual a partícula atingiu a superfície, e após um curto intervalo, as lamelas irão retrair-se devido às tensões superficiais.

O grau de achatamento das partículas depende de alguns fatores como o seu grau de fusão, sua viscosidade e a molhabilidade da superfície. Partículas seguintes, ao depositarem sobre as lamelas anteriormente formadas,

adquirem a mesma forma lamelar, originando uma estrutura anisotrópica paralela à superfície do substrato, construindo desta forma o revestimento (Harmsworth *et* Stevens, 1998).

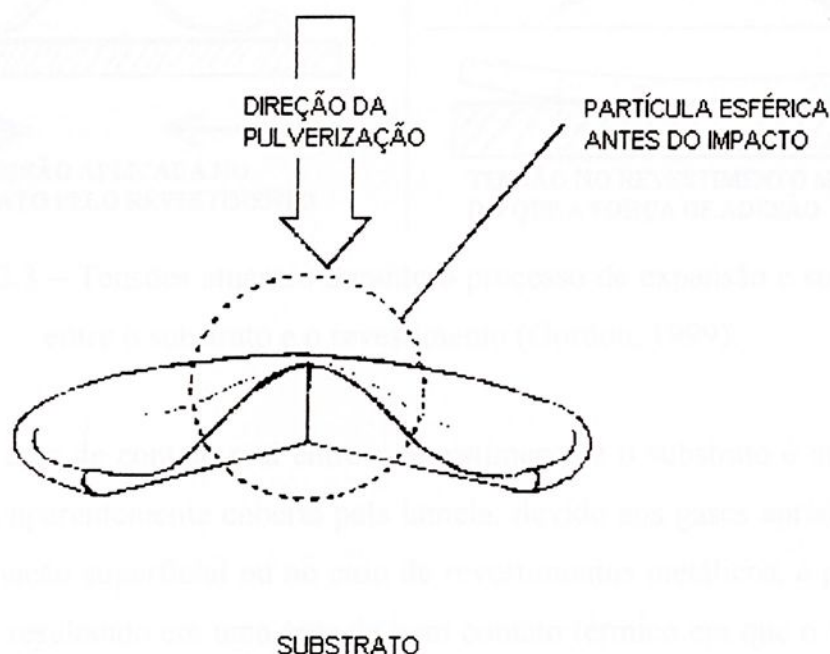
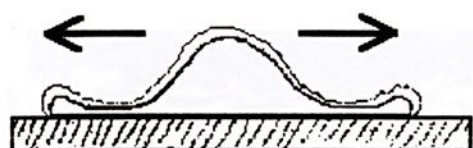


FIGURA 2.2 – Diagrama esquemático da partícula atingindo o substrato (Herman, 1988).

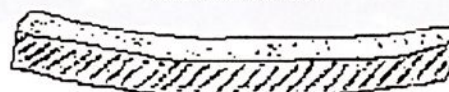
O controle da temperatura do substrato durante o processo de deposição é muito importante, pois a diferença entre o coeficiente de expansão térmica do revestimento cerâmico e do substrato metálico, junto ao forte gradiente de temperatura, no início da deposição, entre o substrato e as partículas cerâmicas originará tensões térmicas, conforme ilustrado nas figuras 2.3 (a) e 2.3 (b), que geralmente contribuem para o aparecimento de trincas na interface entre o revestimento e o substrato, ou mesmo na descoesão do revestimento cerâmico, conforme ilustrado na figura 2.3 (c), no qual a tensão no revestimento é maior do que a força de adesão na interface, provocando o lascamento do material cerâmico (American Welding Society, 1985 e Gordon, 1999).

TRAÇÃO APLICADA PELO
SUBSTRATO DEVIDO A CONTRAÇÃO
DO REVESTIMENTO

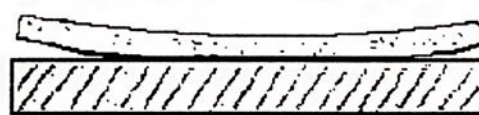


COMPRESSÃO APLICADA NO
SUBSTRATO PELO REVESTIMENTO (a)

REVESTIMENTO
TRACIONADO



SUBSTRATO
COMPRIMIDO (b)



TENSÃO NO REVESTIMENTO MAIOR
DO QUE A FORÇA DE ADESÃO (c)

FIGURA 2.3 – Tensões atuantes durante o processo de expansão e solidificação, entre o substrato e o revestimento (Gordon, 1999).

A área de contato real entre o revestimento e o substrato é menor do que a área aparentemente coberta pela lamela, devido aos gases aprisionados, à contaminação superficial ou no caso de revestimentos metálicos, à presença de óxidos, resultando em uma área de bom contato térmico em que o fluxo de calor flui das partes já solidificadas. A remoção de calor ocorrerá preferencialmente através destas áreas de bom contato térmico, das lamelas ao substratos, perpendicularmente à interface (Bianchi *et al.*, 1997 e Ohmori *et al.*, 1993)

2.1.3 Microestrutura do revestimento.

De maneira geral, a microestrutura do revestimento pode ser representada conforme ilustra a secção transversal apresentada na figura 2.4, onde AB, BC e CD são setores desta seção, o ponto A, a periferia do depósito, e o ponto D, o centro. As partículas na periferia externa (A) do depósito são amplamente espaçadas, apresentando uma fraca aderência ao substrato. Na zona periférica do depósito, a densidade de deposição é muito dependente do tamanho da partícula.

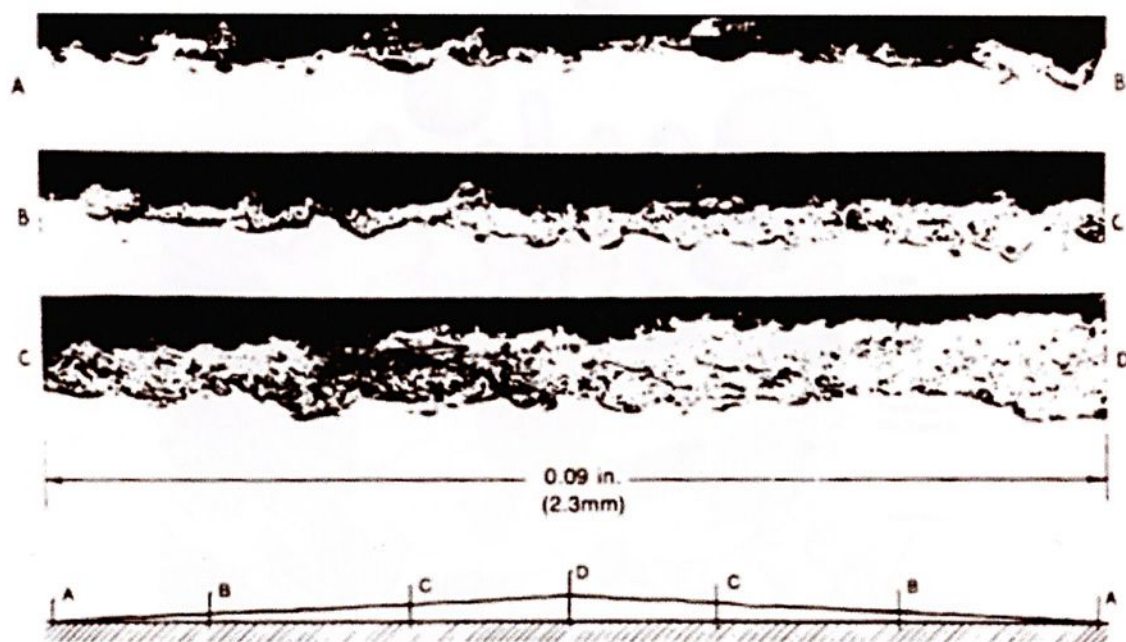


FIGURA 2.4 - Seção transversal típica de um depósito por aspersão térmica - a uma passada da pistola de aspersão (American Welding Society, 1985).

A região central (entre C e C) apresenta o depósito de um revestimento mais denso e espesso. Na região indicada pela seção AB, o revestimento depositado apresenta-se extremamente poroso.

A microestrutura final dos revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma apresenta-se não homogênea, sendo uma mistura das características de cada seção, devido à movimentação da pistola e do substrato durante a aplicação do revestimento, com uma estrutura lamelar, composta de lamelas que possuem contato imperfeito entre si, originando uma alta densidade de poros, vazios, partículas não fundidas e inclusões, conforme ilustra a figura 2.5. Além disso, a alta taxa de solidificação, durante a deposição, origina uma grande densidade de trincas térmicas, tanto entre as lamelas, quanto no interior das mesmas (American Welding Society, 1985; Funke, 1998; Erickson *et al.*, 1998 e Schwingel *et al.*, 1998; Ding *et al.*, 1993).

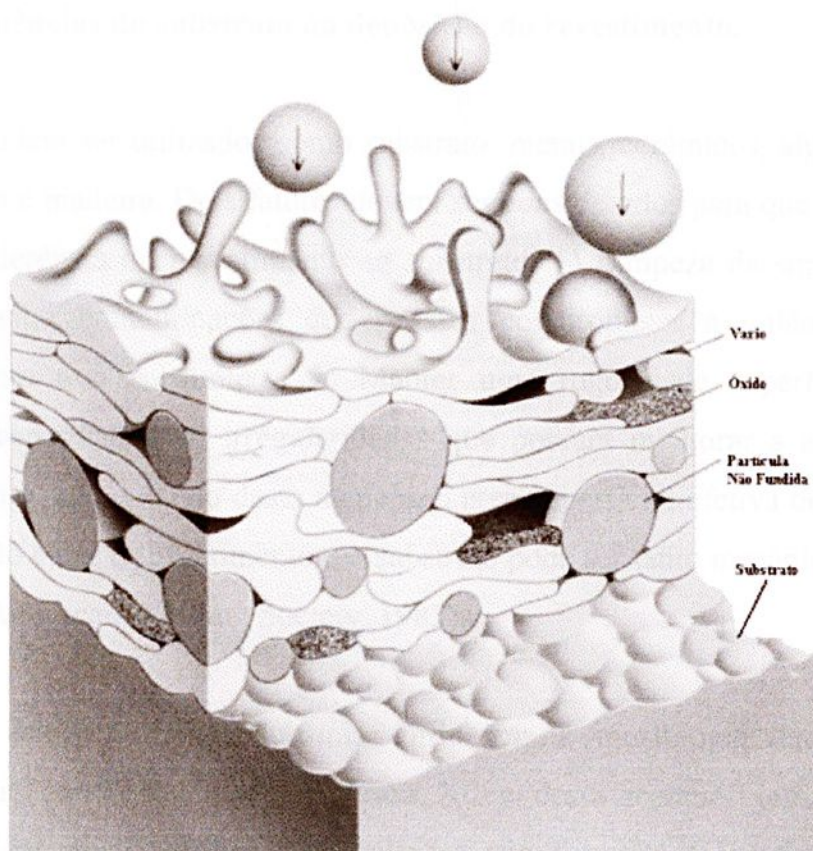


FIGURA 2.5 – Esquema da seção transversal, em que mostra a formação e a microestrutura dos revestimentos por aspersão térmica (Herman, 1988).

Devido a esses fatores, as propriedades mecânicas dos revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma são menores do que aquelas apresentadas pelos mesmos materiais originais. A reação dos gases do processo e a atmosfera que rodeia as partículas fundidas também são responsáveis pelas diferenças químicas e estruturais encontradas entre os materiais depositados em ar ambiente e o mesmo material original (American Welding Society, 1985).

2.1.4 Influências do substrato na deposição do revestimento.

Podem ser utilizados como substrato: metais, cerâmicos, alguns tipos de plástico e madeira. Dois fatores devem ser considerados para que haja uma perfeita aderência do revestimento ao substrato: 1) Limpeza da superfície, a fim de evitar contaminações que possam comprometer a união entre o revestimento e o substrato e 2) Manter uma rugosidade superficial que promova asperidades ou irregularidades que possam melhorar a adesão do revestimento, aumentando desta maneira a área superficial efetiva de contato, pois a união entre o revestimento e o substrato pode ser tanto mecânica quanto química (American Welding Society, 1985).

A temperatura do substrato influencia a morfologia das lamelas depositadas, conforme ilustra a figura 2.6 e desta maneira influencia as características microestruturais do revestimento formado (Fauchais *et al.*, 1996 e Bianchi *et al.*, 1997).

O deposito efetuado em substrato frio (cerca de 75 °C, segundo Fauchais *et al.*, 1996 e abaixo de 150 °C segundo Bianchi *et al.*, 1997) resulta em lamelas extensamente ramificadas, mais finas e menores, conforme ilustra a figura 2.6(a).

O revestimento apresenta um fraco contato entre as lamelas, com uma grande concentração de poros, causada pelo borrifamento excessivo, gerando fragmentos de partículas finas.

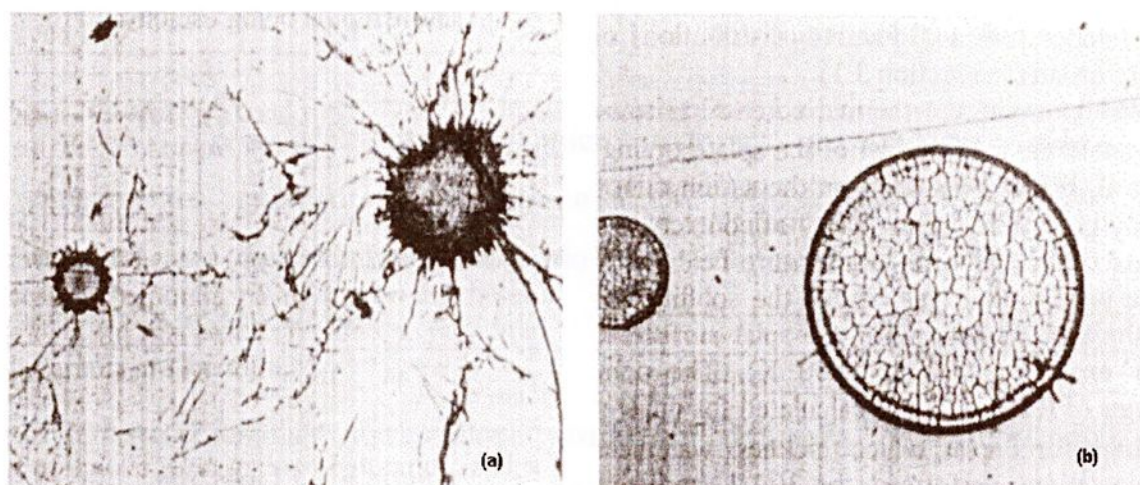


FIGURA 2.6 – Diferença entre as morfologias das lamelas em função da temperatura do substrato. (a) Lamela depositada em substrato frio (c. 75 °C), (b) Lamela depositada em substrato pré-aquecido (c.300-600 °C) (Fauchais *et al.*, 1996).

Já o depósito efetuado em substrato aquecido (entre 300 e 600 °C), origina lamelas esféricas, conforme ilustra a figura 2.6(b), apresentando uma boa área de contato em toda a sua superfície, permitindo um contato interlamelar melhor. O revestimento apresenta uma quantidade menor de poros, sendo que as lamelas depositadas em seguida continuam apresentando a forma esférica, exceto em locais próximos à vazios, nos quais é observado um certo borrifamento (Bianchi *et al.*, 1997).

Bianchi *et al.* (1997)b, observaram que aumentando o nível de rugosidade apresentado pelo substrato provoca modificações na morfologia das lamelas depositadas, melhorando a sua molhabilidade, ou seja, aumentando a aderência do revestimento ao substrato, apesar das morfologias continuarem a seguir o comportamento descrito anteriormente.

2.1.5 Defeitos microestruturais.

Os principais defeitos microestruturais apresentados pelos revestimentos cerâmicos são os poros e as microtrincas. Estes defeitos são inerentes aos revestimentos, podendo ser diminuídos, alterando-se os parâmetros de deposição.

A porosidade apresenta-se distribuída por toda a estrutura do revestimento, apresentando duas faixas distintas de diâmetro: pequenos poros, correspondentes a parte não unida entre as lamelas e as microtrincas verticais, variando de 0,02 a 0,2 μm de diâmetro e os grandes poros, resultantes do destacamento de partículas insuficientemente achatadas, devido à presença de interfaces não unidas ou de microtrincas, variando de 1 a 10 μm (McPherson *et* Shafer, 1982 e Ohmori *et* Li, 1998).

Em relação às microtrincas, McPherson *et* Shafer (1982) observaram, pela análise microscópica, a existência de uma rede de finas trincas perpendiculares ao plano das lamelas, originária da tensão produzida pela contração térmica das lamelas durante o resfriamento até atingir a temperatura de solidificação.

Realizando testes mecânicos, Erickson *et al.* (1998) demonstraram que os revestimentos tendem a fraturar ao longo das trincas térmicas e das porosidades, com uma intensidade muito maior do que nas interfaces entre as lamelas, indicando que nas trincas térmicas e nas porosidades apresentam-se os pontos de ligações mais fracos nos revestimentos, a partir dos resultados apresentados pelos testes para a caracterização das propriedades mecânicas dos revestimentos (como os testes de tração, de resistência ao desgaste, de erosão e da mecânica das fratura). Já Ohmori *et al.* (1990) demonstraram que a

fratura em um revestimento ocorre geralmente nas interfaces entre as lamelas, sugerindo que estas interfaces são as partes mais fracas de um revestimento.

Schwingel *et al.* (1998) observaram que o destacamento das lamelas e a posterior fragmentação dos revestimentos são impulsionadas pelas tensões resultantes tanto da oxidação ocorrida na interface entre o revestimento e o substrato, quanto pelo choque térmico entre o revestimento e o substrato, identificando que a rede de microtrincas no interior dos revestimentos é composto por dois tipos distintos de trincas : (1) trincas por segmentação que avançam da superfície do revestimento até a interface revestimento/ substrato, freqüentemente acompanhadas por (2) trincas ramificadas, originadas das trincas de segmentação, que ao contrário destas, avançam paralelamente ao plano do revestimento.



2.2 Desgaste Erosivo Em Revestimentos Cerâmicos.

2.2.1 Introdução.

Erosão é uma forma de desgaste causado pelo impacto de partículas contra um objeto, ocasionando uma remoção de material do objeto impactado (Jahanmir, 1994). O estudo da ação erosiva de partículas em movimento rápido é de importância primordial em muitas aplicações de engenharia, tais como no transporte pneumático de sólidos, no qual os dutos podem sofrer danos severos; em turbinas a gás, onde a erosão das lâminas pelas partículas que deixaram a câmara de combustão podem diminuir drasticamente seu tempo de uso e os dutos de transporte de minério. O desgaste erosivo pode apresentar aplicações úteis, como o “shot peening”, jateamento de areia e a perfuração erosiva em materiais duros. Pode-se definir a taxa de erosão em relação à perda de peso, perda de volume ou à perda de espessura do material erodido. Desde as últimas décadas, quase todos os aspectos desse assunto foram investigados detalhadamente. De extrema importância, foi investigada a influência dos parâmetros da partícula (dureza, tamanho, forma, densidade e friabilidade) e de seu fluxo (velocidade, ângulo de impacto, taxa de fluxo e densidade) sobre o comportamento da erosão. Dos resultados experimentais obtidos, foi obtido um razoável consenso em relação ao mecanismo e comportamento da erosão, principalmente em casos de materiais metálicos (Abbade, 1999).

Os principais parâmetros envolvidos no desgaste erosivo, quando um fluxo de fluido, líquido ou gasoso, contendo partículas sólidas, é direcionado contra uma superfície sólida são: o ângulo (θ) de impacto do fluxo, a velocidade (v) de impacto do fluxo, as características da partícula e do material alvo, a quantidade de partículas impactadas ou tempo de exposição ao impacto e a concentração de partículas no fluido. O ângulo de impacto (θ) é o

ângulo interno formado pela direção do fluxo e a superfície atingida pelo impacto, conforme ilustra a figura 2.7.

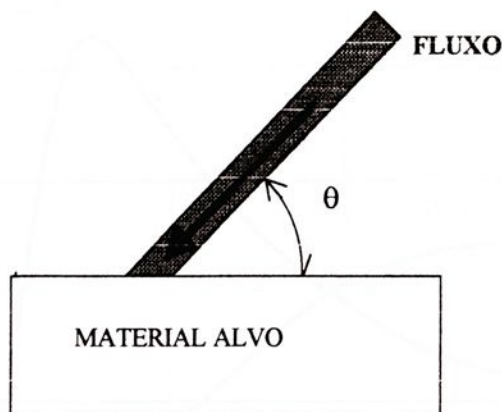


FIGURA 2.7 - Representação do ângulo de impacto do fluxo sobre a superfície atingida (Abbade, 1999).

O fluido gasoso, no qual as partículas sólidas são transportadas no processo de erosão em meio gasoso pode ser o ar ou qualquer outro tipo de gás. Como fluido líquido, pode-se utilizar água ou qualquer outro líquido como meio transportador das partículas sólidas, na erosão em meio líquido. O caso particular do fluido líquido composto por água, é denominado fluido aquoso.

2.2.2 Influência do ângulo de impacto no comportamento erosivo.

Na erosão ocorrida em meio gasoso, encontramos um comportamento típico para materiais dúcteis e outro para materiais frágeis, conforme ilustrado na figura 2.8.

Através da figura, observa-se que os materiais dúcteis apresentam uma taxa de erosão crescente até um máximo, localizado sob um ângulo de impacto entre 15° e 30° , decrescendo em seguida até o ângulo de impacto de 90° , enquanto os materiais frágeis apresentam crescimento contínuo até um valor máximo, localizado no ângulo de impacto de 90° (Finnie, 1995).

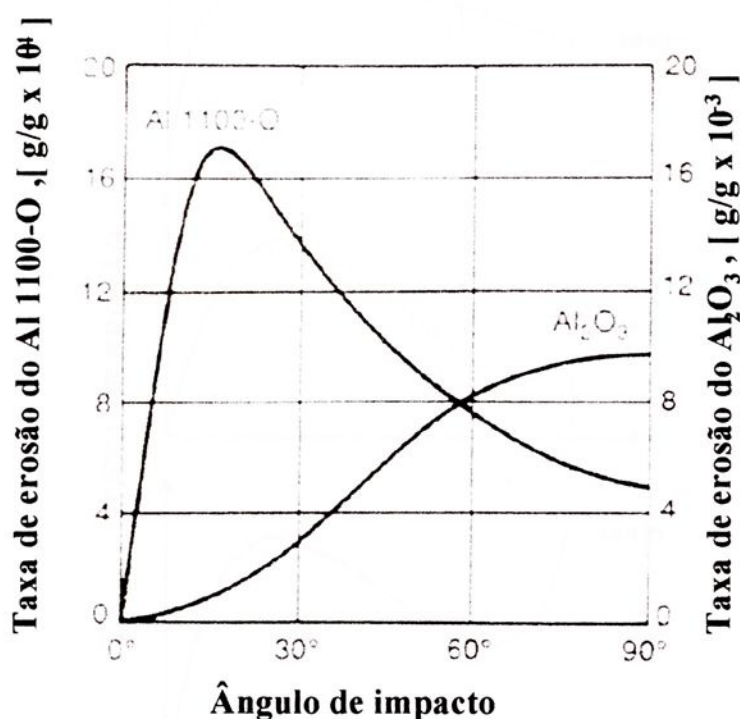


FIGURA 2.8 – Influência do ângulo de impacto sobre a erosão em meio gasoso (Finnie, 1995).

Porém, na erosão ocorrida em meio líquido, não há concordância na literatura, tanto para materiais dúcteis, quanto frágeis, quanto ao comportamento e ao ângulo de impacto na qual a taxa de erosão é máxima.

A figura 2.9 ilustra três modelos, para metais dúcteis, de comportamento da taxa de erosão em função do ângulo de impacto, encontrado na literatura conforme relacionado por Abbade (1999).

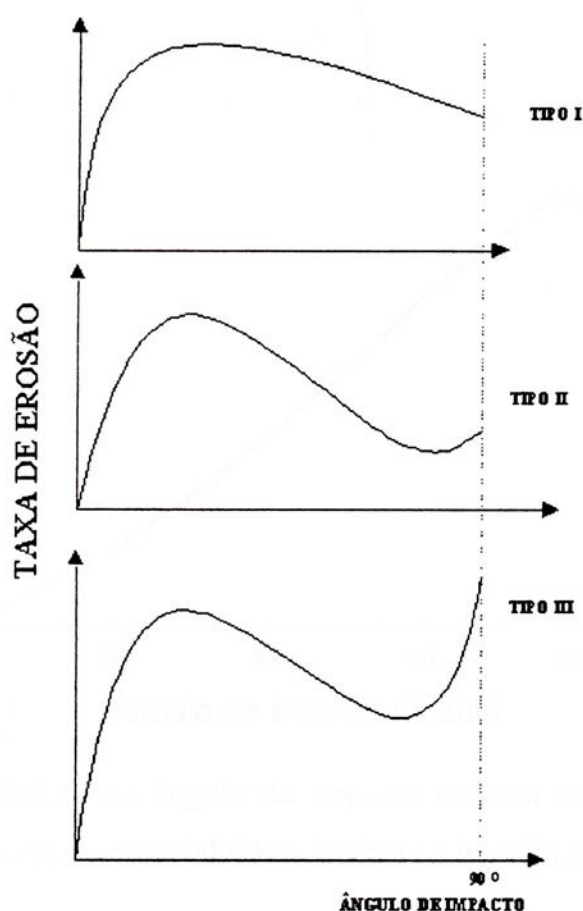


FIGURA 2.9 – Tipos de comportamento da taxa de erosão por partículas sólidas em meio aquoso em função do ângulo de impacto, para metais dúcteis (Abbade, 1999).

No caso de materiais frágeis, foi observado que também ocorre um comportamento diferente do encontrado na erosão por partículas em meio gasoso, conforme ilustra a figura 2.10. Neste caso, a taxa de erosão máxima é encontrada em um ângulo intermediário de cerca de 80° , diminuindo com o aumento do ângulo de impacto até 90° , concluindo que este comportamento pode ser explicado pelo efeito de expansão da pasta aquosa. Desta maneira, devido a alta viscosidade do líquido, o ângulo de impacto das partículas poderá ser diferente do ângulo de impacto nominal da pasta aquosa, resultando em um comportamento erosivo diferente do apresentado no meio gasoso (Lin *et Shao*, 1991).

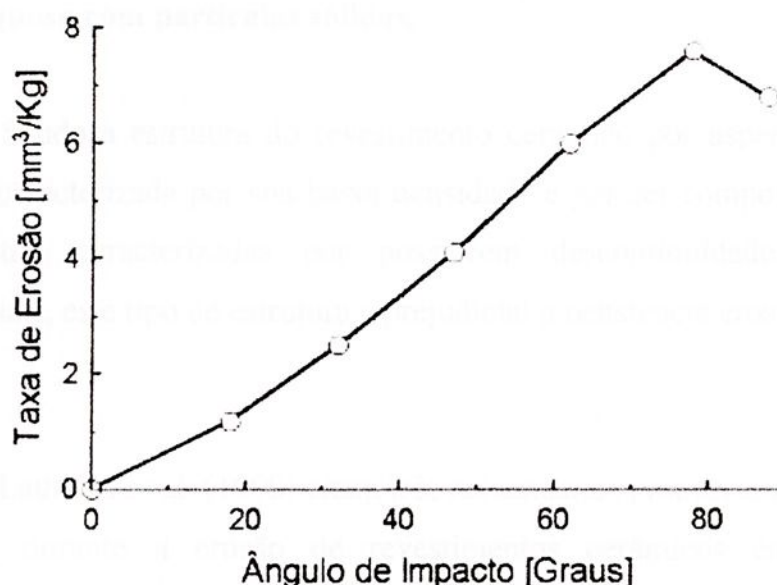


FIGURA 2.10 – Efeito do ângulo de impacto na taxa de erosão por pasta aquosa de material frágil (vidro) (Lin *et* Shao, 1991).

Zhao *et al.* (1995), ao analisar os perfis das crateras de erosão, realizada em ângulo normal de impacto, de diferentes materiais frágeis e dúcteis, observaram que para os materiais frágeis, a profundidade máxima de erosão localiza-se no centro da cratera, enquanto para os materiais dúcteis, a área central não é severamente erodida, apresentando a profundidade máxima cerca de 1,3 mm do centro da cratera, concluindo que além de apresentarem comportamento erosivo diferentes, em função do ângulo de impacto das partículas erosivas, também apresentam comportamento erosivo diferente ao longo do raio da cratera, presumivelmente em função da variação do ângulo de impacto apresentado pelas partículas no fluido líquido

2.2.3 Influência da estrutura dos revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma no mecanismo de desgaste de processos erosivos por fluxo aquoso com partículas sólidas.

Sendo a estrutura do revestimento cerâmico por aspersão térmica a plasma caracterizada por sua baixa densidade e por ser composta de lamelas justapostas, caracterizadas por possuírem descontinuidades internas e superficiais, este tipo de estrutura é prejudicial à resistência erosiva (Xia *et al.*, 1999).

Lathabai *et al.* (1998) citam três mecanismos propostos de remoção de material durante a erosão de revestimentos cerâmicos em função da microestrutura. Em microestruturas em que há baixa coesão entre as lamelas, a perda de material ocorre pela fratura dos contornos das lamelas, o que também foi observado por Xia *et al.* (1999) e Nichols *et al.* (1999); porém, se a coesão entre as lamelas for aumentada, o processo de remoção de material dominante passa a ser a fratura, microlascamento e destacamento das lamelas. Segundo estes pesquisadores, a estrutura lamelar auxilia a propagação de trincas cruzadas, quando do impacto das partículas, levando a lascar-se do revestimento, a partir do ponto de descontinuidade, existente entre as lamelas, conforme ilustra a figura 2.11.

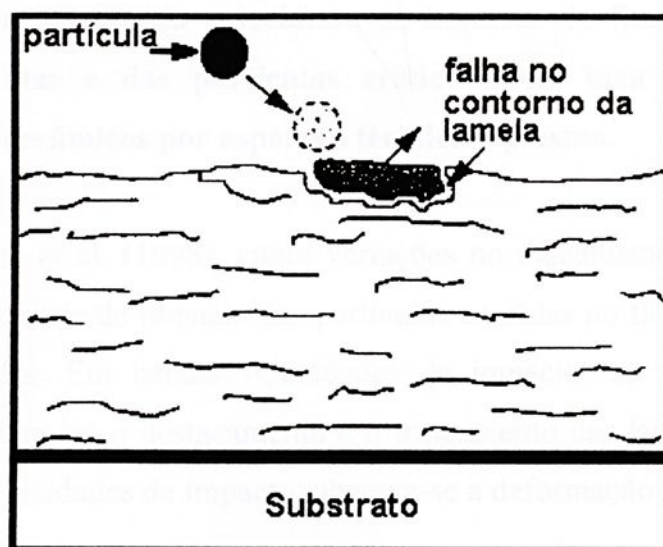


FIGURA 2.11 – Modo de falha de um revestimento cerâmico por aspersão térmica a plasma no desgaste erosivo (Nichols *et al.*, 1999).

Lathabai *et al.* (1998) também relacionam a microestrutura, a fraca coesão entre as lamelas e as trincas como os fatores que controlam os mecanismos de remoção durante o processo erosivo, e cita que há um consenso geral indicando “que a boa resistência à erosão está associada com os revestimentos que exibem baixa porosidade, tamanho de lamelas finas, ausência de trincas e boa união entre as lamelas. Desta forma, processos de aspersão térmica que possam melhorar a estrutura dos revestimentos tenderão a melhorar a resistência à erosão.

Xia *et al.* (1999) e Nichols *et al.* (1999) observaram também que as lamelas individuais que compõem a estrutura do revestimento, quando impactadas por partículas erodentes, no ensaio de erosão realizado em altas temperaturas, pode tanto deformar-se plasticamente quanto trincar-se.

2.2.4 Influência da velocidade de impacto do fluxo aquoso com partículas sólidas e das partículas erodentes na taxa de erosão de revestimentos cerâmicos por aspersão térmica a plasma.

Lathabai *et al.* (1998), citam variações no mecanismo de erosão em função da velocidade de impacto das partículas contidas no fluxo aquoso com partículas sólidas. Em baixas velocidades de impacto, os mecanismos de erosão apresentam ser o destacamento e o trincamento das lamelas, enquanto que em altas velocidades de impacto, observa-se a deformação plástica como o mecanismo de erosão atuante.

Em relação ao tamanho e forma das partículas, Lathabai *et al.* (1998), realizaram ensaios erosivos em revestimentos cerâmicos, metálicos e poliméricos, além de alumina e aço inoxidável compactos, observando que a taxa de erosão dos revestimentos cerâmicos e metálicos e da alumina compacta aumentaram quando houve a troca das partículas erodentes de partículas arredondadas de SiO_2 para partículas mais duras e angulares de SiC , de dimensões iguais. Mas, o revestimento polimérico e o aço inoxidável compacto apresentaram taxas de erosão semelhantes, usando ambos os tipos de erodentes.

Zhao *et al.* (1999)b, relacionam três fatores críticos que tornam uma partícula mais erodente do que outra : sua maior dureza, sua superfície mais rugosa e a ação sinérgica entre partículas de tamanhos diferentes no fluxo aquoso.



2.2.5 Influência da dureza do revestimento cerâmico por aspersão térmica a plasma na taxa de erosão.

Lathabai *et al.* (1998) observaram que a dureza do revestimento (que influencia os mecanismos de erosão no caso de materiais compactos) não fornece uma indicação do comportamento erosivo tanto dos revestimentos cerâmicos quanto dos revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica a plasma.

Zhao *et al.* (1999), observaram que a melhor correlação entre a dureza com a erosão por fluxo aquoso contendo partículas sólidas foi observada na erosão de materiais cerâmicos originais, sendo poucos os dados encontrados na literatura relacionando a dureza de revestimentos cerâmicos depositados por aspersão térmica a plasma com a erosão por fluxo aquoso com partículas sólidas. Utilizando-se de medidas de dureza Vickers e comparando a taxa de erosão de revestimentos por aspersão térmica de um determinado material cerâmico, com o mesmo material cerâmico original, concluíram que o processo de revestimento por aspersão térmica influi negativamente na resistência do material contra a erosão por fluxo aquoso contendo partículas sólidas, por apresentar maior taxa de erosão e menor dureza do que a apresentada pelo mesmo material cerâmico original.

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 Materiais.

3.1.1 Pós de revestimento.

Foi utilizado como revestimento cerâmico o pó comercial METCO 204NS-10, composto de 92% de Zircônia e 8% de Ítria. As características físico-químicas do pó são: granulometria na faixa de 106 – 140 mesh, ponto de fusão de 2480 °C e densidade de 5,4 g/cm³.

Foi utilizado como camada intermediária o pó cedido pela empresa P/M Pós Metálicos Especiais Ltda., marca P/M 820M, composta de uma liga 80% níquel e 20% cromo, com sua granulometria variando na faixa de 140 – 325 mesh.

3.1.2 Substratos.

Foi utilizado como materiais do substrato, um aço de baixo carbono, **SAE 1010** e **Latão**. A composição química e as propriedades mecânicas dos substratos estão indicadas nas tabelas 3.1 e 3.2.



TABELA 3.1 – Composição Química e Propriedades Mecânicas do Substrato de Aço SAE 1010.

Composição Química em peso	Propriedades Mecânicas
0,08% C, 0,01% Si, 0,40% Mn, 0,018% P, 0,016% S, 0,02% Ni, 0,01% Mo, 0,01% Cu e 0,004% Al	Tensão de Escoamento : 216 MPa Limite de Resistência a Tração : 324 MPa Dureza : 105,1 Hv Ductilidade, % de Alongamento (em 50mm) : 28 %

TABELA 3.2– Composição Química e Propriedades Mecânicas do Substrato de Latão.

Composição Química em peso	Propriedades Mecânicas
60% Cu e 40% Zn	Tensão de Escoamento : 77 MPa Limite de Resistência a Tração : 310 MPa Dureza : 135,5 Hv Ductilidade, % de Alongamento (em 50mm) : 68 %

3.1.3 Areia.

Foi utilizado como partícula de erosão, areia fina comum, obtida por peneiramento seletivo, após secagem em estufa (quantidade de 10 kg, a 150 °C durante 6 horas), com peso específico igual a 2,59 g/cm³ e granulação definida na faixa de 149 a 297 µm.

3.2 Equipamentos utilizados.

3.2.1 Equipamento de aspersão térmica a plasma.

A deposição do revestimento foi realizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, utilizando-se uma pistola de aspersão térmica da marca METCO, modelo 3MBII.

O equipamento de aspersão térmica a plasma é composto basicamente pelos seguintes componentes :

(a) Trocador de calor.

O trocador de calor é composto de dois circuitos : o circuito aberto, consistindo de uma caixa d'água de 500 litros, na qual a temperatura máxima da água deve ser de 19 °C; e o circuito fechado, responsável pela refrigeração da pistola de aspersão, que é resfriado pelo circuito aberto. A temperatura da água não deve passar dos 24 °C, para não diminuir a vida útil da pistola. A água neste circuito deve ser destilada e ionizada, impedindo desta forma a impregnação de partículas no bico da pistola, que poderá dificultar a passagem de corrente no bico.

(b) Unidade de alimentação de pó.

Composta de uma linha de argônio, responsável pelo carreamento do pó, por ser um gás inerte, não combinando com o pó e o substrato, e por uma linha de ar comprimido, com a função de vibrar o reservatório de pó.

(c) Pistola de aspersão térmica.

A pistola de aspersão térmica é conectada a dois cabos, cuja finalidade é energizá-la com uma determinada tensão e corrente. Os cabos estão inseridos em uma mangueira, na qual a água (fornecida pelo circuito fechado do

trocador de calor) passa em seu interior. Também são conectadas as mangueiras responsáveis pela alimentação dos gases que darão origem ao plasma (argônio e hidrogênio) e o cabo ligado à unidade de controle.

(d) Unidade de controle.

É a responsável pelo controle dos principais parâmetros da deposição, que são a vazão e a pressão dos gases primário e secundário e a tensão e a corrente de operação da pistola.

3.2.2 Equipamento de ensaio de erosão.

Foi utilizado o equipamento de ensaio de erosão por partículas sólidas em meio aquoso projetado, fabricado e montado no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP (Abbade, 1999), conforme esquema mostrado na figura 3.1.

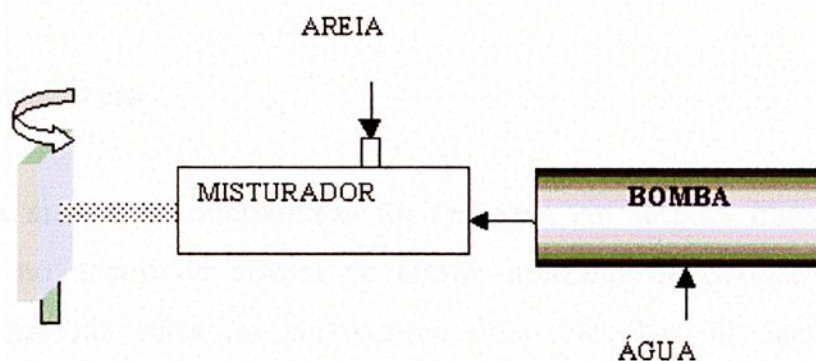


FIGURA 3.1 – Representação esquemática do aparelho de erosão por partículas sólidas em meio aquoso (Abbade, 1999).

3.2.3 Microscopia óptica.

As micrografias das amostras feitas por microscopia óptica foram realizadas no microscópio NEOPHOT 32 do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura e microanálise.

As micrografias das amostras por microscopia eletrônica de varredura e a microanálise das amostras foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura marca JEOL, modelo JXA 840A com Electron Probe Microanalyser.

3.2.5 Metalização.

Antes da efetuar as microscopias eletrônica de varredura, as amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro, utilizando-se um metalizador marca BAL-TEC, modelo Sputter Coater SCA 050, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

3.2.6 Microdureza.

A análise de microdureza foi realizada em secções transversais do substrato no centro da cratera de erosão utilizando-se o microdurômetro Vickers que faz parte do microscópio ótico Neophot 30, localizado no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMAT) do DMT-FEG-UNESP.

3.2.7 Rugosímetro.

O nível de rugosidade superficial dos corpos-de-prova, antes da deposição do revestimento cerâmico e da camada intermediária, foi medido

através do rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SurfTest 301, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP.

3.2.8 Balança.

A areia utilizada nos ensaios erosivos foi pesada utilizando-se a balança Sartorius. Os corpos-de-prova, após o ensaio erosivo, foram pesados, utilizando-se a balança de precisão Marte, modelo AL200. Ambas as medições foram realizadas no Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP.

3.2.9 Seccionamento dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova de aço 1010 foram seccionados utilizando-se o equipamento ISOMET 1000, do LAIMAT –DMT-FEG-UNESP, com velocidade de corte variando na faixa entre 100 – 150 rpm, enquanto os corpos-de-prova de latão foram seccionados utilizando-se o equipamento ACCUTOM do Laboratório de Materiais, da Universidade de Taubaté - UNITAU, com velocidade de corte de 1000 rpm. Em ambos os equipamentos foram usados discos de corte de diamante.

3.3 Parâmetros dos ensaios.

3.3.1 Parâmetros utilizados no revestimento do substrato.

A tabela 3.3 lista os valores dos principais parâmetros envolvidos na deposição do revestimento cerâmico.

TABELA 3.3 – Parâmetros envolvidos na deposição do revestimento cerâmico.

Tensão [V]	450
Corrente [A]	65
Distância de aplicação [mm]	100

3.3.2 Parâmetros utilizados nos ensaios de erosão.

Os ensaios de erosão por partículas sólidas em meio aquoso foram realizados com os seguintes parâmetros:

- velocidade do fluxo: 2 m/s;
- ângulo de incidência do fluxo: 30 e 90 graus;
- tamanho da partícula de erosão : 149 a 297 μm ;
- distância entre o orifício de saída do fluxo e a superfície alvo: 20 mm;
- quantidade de areia impactada: 20g;
- temperatura: ambiente (22 °C)

3.4 Metodologia aplicada.

3.4.1 Metodologia aplicada na preparação dos substratos.

Todos os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de erosão foram fabricados em placas retangulares de 60 mm de comprimento por 30 mm de largura e 6 mm de espessura. Para manter um acabamento uniforme em todos os corpos-de-prova antes da deposição do revestimento cerâmico, foi efetuado um lixamento, através da sequência de lixas de granas 100, 220 e 320.

Após o acabamento, todos os corpos-de-prova foram submetidos à um jateamento de partículas de alumina, a fim de se obter uma rugosidade

superficial que permitisse a melhor adesão do revestimento à superfície do substrato.

Para garantir a uniformidade da rugosidade em todos os corpos-de-prova, alguns cuidados foram tomados, principalmente quanto a sequência de passadas do jateador. O jateamento foi obtido por duas passadas do jateador, compostas por passadas individuais de 2 mm de espessura. Este procedimento mostrou-se eficaz quanto à uniformização da rugosidade superficial.

3.4.2 Metodologia aplicada na deposição da camada intermediária e do revestimento no substrato.

A deposição da camada intermediária e do revestimento cerâmico foi realizado nos corpos-de-prova, previamente limpos e com a superfície jateada com partículas de alumina. Os corpos-de-prova foram dispostos lado a lado (num suporte apropriado), de modo que a deposição fosse realizada sucessivamente.

Nos corpos-de-prova que receberam a camada intermediária de níquel-cromo, a deposição do revestimento de zircônia- 8% ítria, seguiu a mesma metodologia descrita anteriormente, no item 3.4.1.

3.4.3 Metodologia aplicada aos ensaios de erosão.

O ensaio de erosão por partículas sólidas em meio aquoso foi desenvolvido conforme metodologia definida a seguir :

- Limpeza dos corpos-de-prova com acetona para retirada da gordura e sujeira proveniente do manuseio.
- Permanência dos corpos-de-prova em estufa (temperatura de 100 °C) por um período de ½ hora, para garantir a completa secagem do revestimento cerâmico.



- Pesagem do corpo-de-prova de erosão, antes do ensaio, determinando-se sua massa inicial, ou seja, antes do processo de erosão.
- Ensaio de erosão com os parâmetros de teste anteriormente descritos.
- Limpeza e nova permanência dos corpos-de-prova em estufa por ½ hora.
- Pesagem do corpo-de-prova de erosão, após o ensaio, determinando-se sua massa final.
- Proteção de determinadas amostras com esmalte incolor para posterior observação por microscopia eletrônica de varredura.

3.4.4 Metodologia aplicada na determinação da taxa de erosão.

Os resultados dos ensaios de erosão por partículas sólidas em meio aquoso efetivamente medido foi a perda de massa do corpo-de-prova através da diferença de massas antes e após o ensaio (apêndice A). A taxa volumétrica de erosão utilizada resultou da relação entre a perda volumétrica de material e a quantidade de partículas impactadas (20 g), dada por mm^3 por quilograma.

3.4.5 Metodologia aplicada na preparação das amostras para a microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

As amostras utilizadas para as microscopias ótica e eletrônica de varredura foram selecionadas dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios erosivos. Foram analisadas secções superficiais da superfície não erodida e da cratera de erosão e secções transversais obtidas no centro da cratera de erosão, conforme ilustra a figura 3.2.

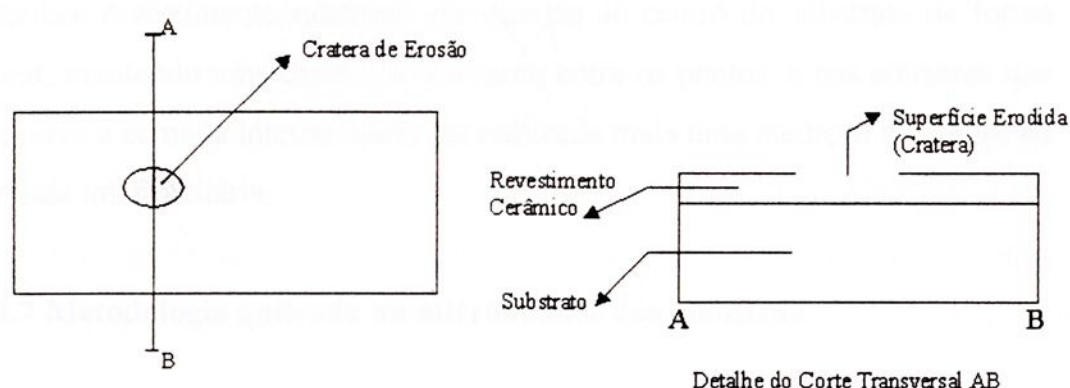


FIGURA 3.2 – Seção transversal do corpo-de-prova.

Tratando-se do revestimento cerâmico ser um material frágil, antes do seccionamento transversal foram tomados alguns cuidados para se evitar possíveis lascamentos superficiais da camada cerâmica. Todas as crateras erosivas à serem seccionadas foram cobertas com uma camada de adesivo epoxi (araldite). A velocidade de corte foi a menor possível e os corpos-de-prova foram posicionados de tal forma que a camada cerâmica fosse a primeira a entrar em contato com o disco de corte. O máquina de corte utilizada foi a ISOMET 1000, porém este equipamento apresentou dificuldades em seccionar os cdps de latão, pois a vibração do corpo-de-prova durante o seccionamento provocou o efeito de caldeamento do substrato de latão. Assim, foi necessário utilizar neste caso a máquina de corte ACCUTOM, com velocidade de corte de 1000 rpm. As seções transversais obtidas foram embutidas a quente em resina baquelite.

3.4.6 Metodologia aplicada nos ensaios de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado nas seções transversais, no centro da cratera de erosão em ângulo de impacto do fluxo líquido de 90° .

Foram realizadas quatro séries de medições paralelas, sendo que em cada série realizou-se a medição da microdureza em 10 pontos à partir da

interface revestimento/substrato em direção ao centro do substrato de forma linear, mantendo uma distância constante entre os pontos, e nas amostras que possuem a camada intermediária foi realizada mais uma medição no centro da camada intermediária.

3.4.7 Metodologia aplicada na microanálise das amostras.

A microanálise foi realizada nas secções transversais, no centro da cratera de erosão, após a obtenção das micrografias através da microscopia eletrônica de varredura destas secções.

A microanálise foi efetuada em pontos aleatoriamente escolhidos, sendo ao menos 1 ponto localizado próximo das interfaces e 1 ponto na superfície do revestimento cerâmico, do substrato e da camada intermediária, quando pertinente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da rugosidade superficial dos corpos de prova antes da deposição do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e da camada intermediária

Os valores médios da rugosidade, obtidos antes da deposição da camada intermediária e do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria, para os corpos de prova de aço SAE 1010 foram : $R_a = 4,72 \mu\text{m}$ e $R_y = 34,27 \mu\text{m}$; e para os corpos de prova de latão foram : $R_a = 5,36 \mu\text{m}$ e $R_y = 38,89 \mu\text{m}$.

4.2 Resultado da microanálise nas secções transversais das crateras de erosão

Os elementos leves, como o oxigênio por ex., não podem ser detectados através deste método; portanto, o resultado obtido por esta análise não está correto, sendo apenas um indicativo da composição química aparente em um determinado ponto.

4.2.1 Revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria em substrato de aço.

O desenho esquemático da secção transversal da cratera e os resultados das análises químicas são ilustrados respectivamente pela figura 4.1 e pela tabela 4.1

Os resultados da microanálise apresentada pela tabela 4.1, para a secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço, conforme lustrado pelo

esquema na figura 4.1, indica que houve difusão de zircônia, do revestimento para o substrato e difusão de ferro, do substrato ao revestimento, em pontos próximos à interface (3 e 4). A migração de ferro observado no ponto (1) e de zircônia observado no ponto (5) podem também estar relacionadas com a difusão destes materiais ou estar associadas ao processo de lixamento e polimento das amostras.



FIGURA 4.1 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de aço, indicando os pontos em que foram feitas as análises.

TABELA 4.1 – Resultado da microanálise na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de aço, conforme esquema ilustrado na figura 4.1

Elemento	Composição Química (% , em peso)				
	1	2	3	4	5
Fe	0,24	3,11	3,00	93,78	94,24
Zr	94,28	94,92	92,01	6,22	5,76
Y	5,48	1,96	4,56	-	-

4.2.2 Revestimento cerâmico a base de zircônia-íttria em substrato de aço, com camada intermediária de níquel-cromo.

O desenho esquemático da secção transversal da cratera e os resultados das análises químicas são ilustrados respectivamente pela figura 4.2 e pela tabela 4.2

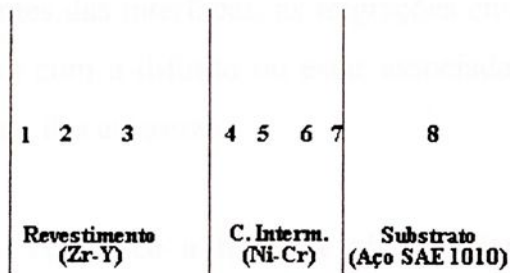


FIGURA 4.2 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de aço com a camada intermediária, indicando os pontos em que foram feitas as análises.

TABELA 4.2 – Resultado da microanálise na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de aço com camada intermediária de níquel-cromo, conforme esquema ilustrado na figura 4.2

Ele- men- to	Composição Química (% , em peso)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe	0,36	0,50	-	5,62	7,50	5,42	8,29	94,93
Zr	93,18	93,40	94,33	27,17	13,46	-	-	7,85
Y	6,47	5,78	5,35	4,67	-	-	-	-
Ni	-	0,32	0,32	67,54	79,03	94,58	91,71	0,22
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-

Os resultados da microanálise apresentados pela tabela 4.2, para a secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de

zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo, conforme ilustrado pelo esquema na figura 4.2, indicam difusões de ferro, do substrato e de zircônia do revestimento para a camada intermediária de níquel-cromo, em pontos próximos às interfaces (4 e 7). Em outros pontos, distantes das interfaces, as migrações encontradas podem estar relacionadas também com a difusão ou estar associadas com o processo de lixamento e polimento das amostras.

4.2.3 Revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria em substrato de latão.

O desenho esquemático da secção transversal da cratera e os resultados das análises químicas são ilustrados respectivamente pela figura 4.3 e pela tabela 4.3.

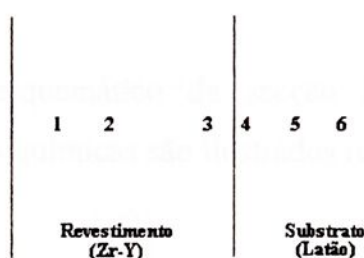


FIGURA 4.3 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de latão, indicando os pontos em que foram feitas as análises.

Os resultados da microanálise, apresentados pela tabela 4.3, para a secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão, conforme ilustrado pelo esquema na figura 4.3, indicam migrações de zircônia, do revestimento para o substrato e de zinco, do substrato para o revestimento, em pontos próximos à interface, e em outros pontos, distantes das interfaces, as migrações

encontradas podem, provavelmente, estar associadas com o processo de lixamento e polimento das amostras.

TABELA 4.3 – Resultado da microanálise na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de latão, conforme esquema ilustrado na figura 4.3.

Elemento	Composição Química (% , em peso)					
	1	2	3	4	5	6
Zr	94,66	94,79	92,82	7,95	4,02	3,95
Y	2,28	3,33	4,65	-	-	-
Cu	-	-	-	41,93	41,60	41,24
Zn	3,06	1,88	2,53	50,12	54,38	54,82

4.2.4 Revestimento depositado no substrato de latão, com a camada intermediária de níquel-cromo.

O desenho esquemático da secção transversal da cratera e os resultados das análises químicas são ilustrados respectivamente pela figura 4.4 e pela tabela 4.4.

Os resultados da microanálise, apresentados pela tabela 4.4, para a secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão com a camada intermediária, conforme ilustrado pelo esquema na figura 4.4, indicam que houve uma pequena difusão de níquel da camada intermediária para o substrato, em um ponto (4) próximo da interface entre o substrato e a camada intermediária de zinco e cobre. Em outros pontos, distantes das interfaces, as migrações observadas podem também estar relacionadas com a difusão ou então com o processo de lixamento e polimento das amostras.

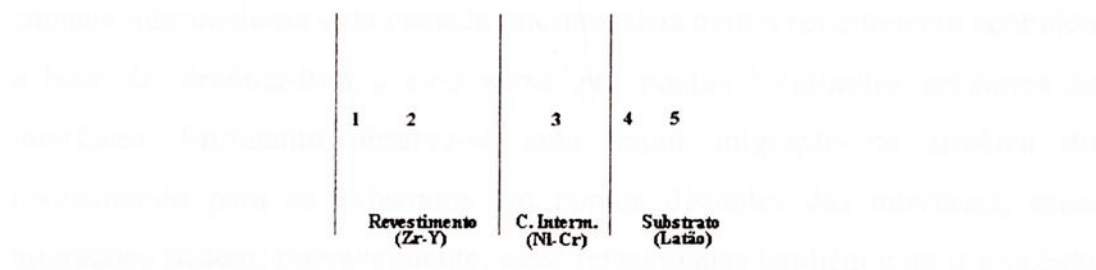


FIGURA 4.4 – Desenho esquemático da secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de latão com a camada intermediária níquel-cromo, indicando os pontos em que foram feitas as análises.

TABELA 4.4 – Resultado da microanálise na secção transversal da cratera de erosão no revestimento depositado em substrato de latão com a camada intermediária, conforme esquema ilustrado na figura 4.4.

Elemento	Composição Química %, em peso				
	1	2	3	4	5
Zr	93,77	89,53	-	3,27	2,58
Y	6,23	6,93	-	-	-
Cu	-	0,47	2,44	41,00	41,41
Zn	-	2,91	-	55,36	55,61
Ni	-	0,16	86,52	0,36	0,39
Cr	-	-	2,82	-	-
Fe	-	-	5,23	-	-

A microanálise no ponto 3, localizando no centro da camada intermediária indica que além do níquel e do cromo, esta camada é composta também por impurezas tais como ferro, em maior quantidade do que o cromo.

Os resultados das tabelas 4.1 a 4.4 indicam que a temperatura do processo de deposição favorece difusões de átomos do substrato para a

camada intermediária e da camada intermediária para o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e vice versa, em pontos localizados próximos às interfaces. Entretanto observa-se uma maior migração de zircônia do revestimento para os substratos em pontos distantes das interfaces; estas migrações podem, provavelmente, estar relacionadas também com o processo de difusão ou então com o processo de lixamento e acabamento das amostras.

4.3 Resultado dos Ensaio de Erosão

A tabela 4.5 ilustra os valores médios da taxa volumétrica de erosão dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia-8% ítria, depositados diretamente nos substratos de aço e de latão, ou em uma camada intermediária de níquel-cromo, previamente depositada sobre os substratos, em função do ângulo de impacto, com nível de confiança de 95%.

TABELA 4.5 – Taxa volumétrica de erosão dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, em função do substrato e do ângulo de impacto com nível de confiança de 95%.

Substrato	Taxa Volumétrica de Erosão (mm ³ /Kg)			
	30°		90°	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Aço	238,4	38,99	322	99,16
Aço/Ni-Cr	262	26,76	406,5	47,95
Latão	178	50,26	250,5	29,89
Latão/Ni-Cr	210	81,50	293,4	19,56

A taxa de erosão, conforme ilustra a tabela 4.5, em um ângulo de impacto de 30°, mostra uma maior dispersão, com 95% de confiança, para o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de

latão com a camada intermediária, enquanto que para um ângulo de impacto de 90° , isto ocorre no revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço. A menor dispersão com 95% de confiança, para um ângulo de impacto de 30° ocorre para o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária enquanto para o ângulo de 90° , isto ocorre no revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão com a camada intermediária.

As figuras 4.5 a 4.10 apresentam os comportamentos da taxa volumétrica de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria com nível de confiança de 95%, em função do ângulo de impacto do fluxo, comparando-se pares de revestimentos cerâmicos de acordo com o substrato utilizado.

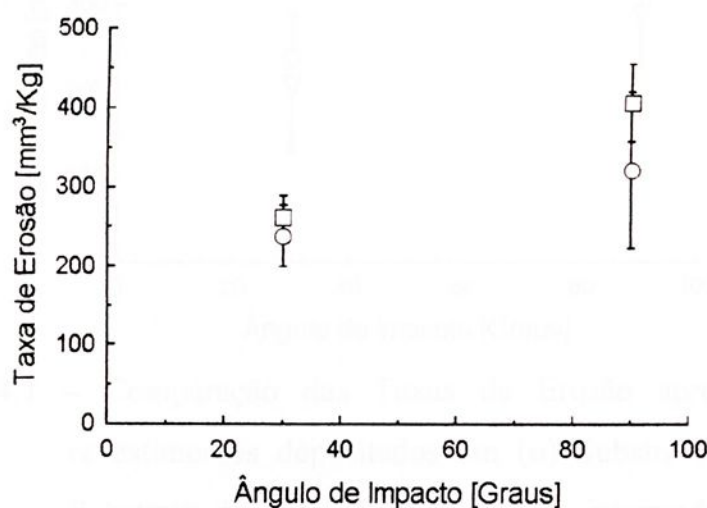


FIGURA 4.5 – Comparação das Taxas de Erosão apresentadas pelos revestimentos depositado em (○) Substrato de Aço; (□) Substrato de Aço com a camada intermediária de níquel cromo, com nível de confiança de 95%.

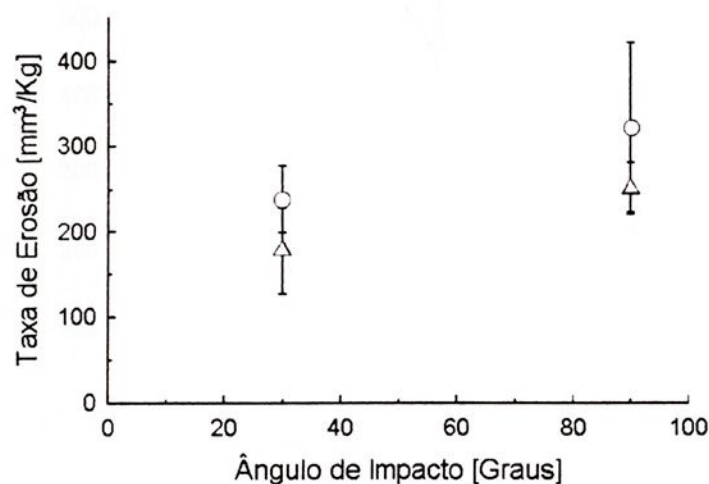


FIGURA 4.6 – Comparação das taxas de erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em (o) Substrato de Aço e (Δ) Substrato de Latão, com nível de confiança de 95%.

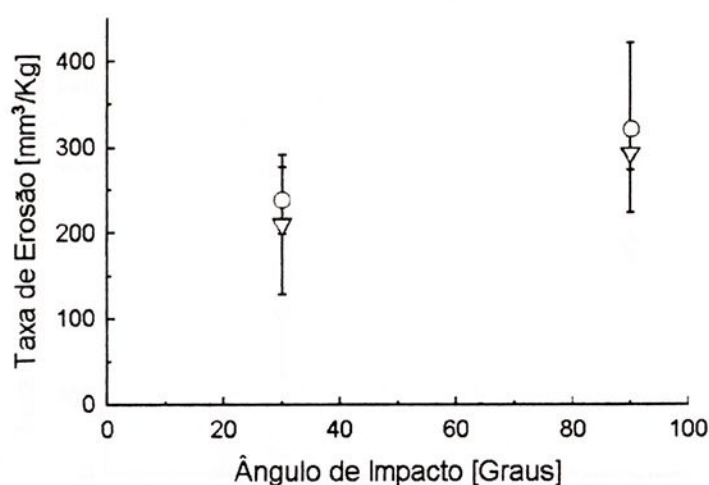


FIGURA 4.7 – Comparação das Taxas de Erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em (o) Substrato de Aço e (∇) Substrato de Latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.

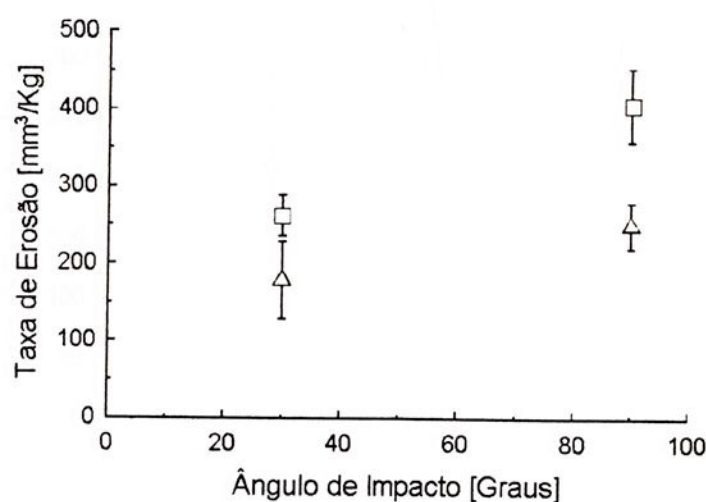


FIGURA 4.8 – Comparação das Taxas de Erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em: (□) Substrato de Aço com a camada intermediária de níquel-cromo e (Δ) Substrato de Latão, com nível de confiança de 95%.

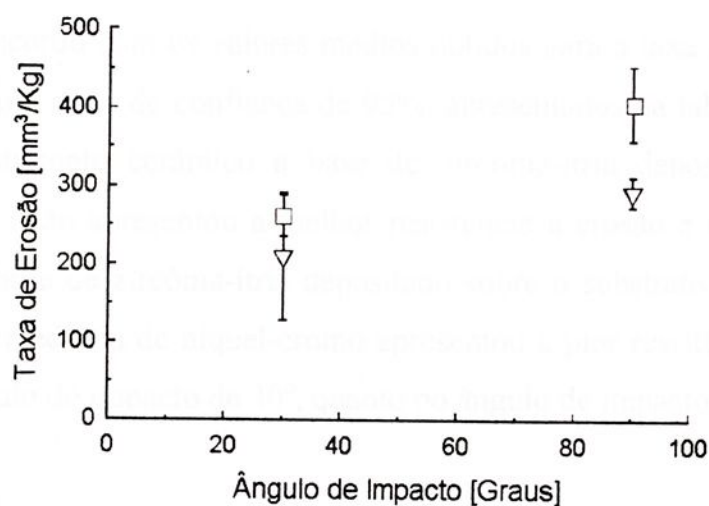


FIGURA 4.9 – Comparação das Taxas de Erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em: (□) Substrato de Aço com a camada intermediária de níquel-cromo e (▽) Substrato de Latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.

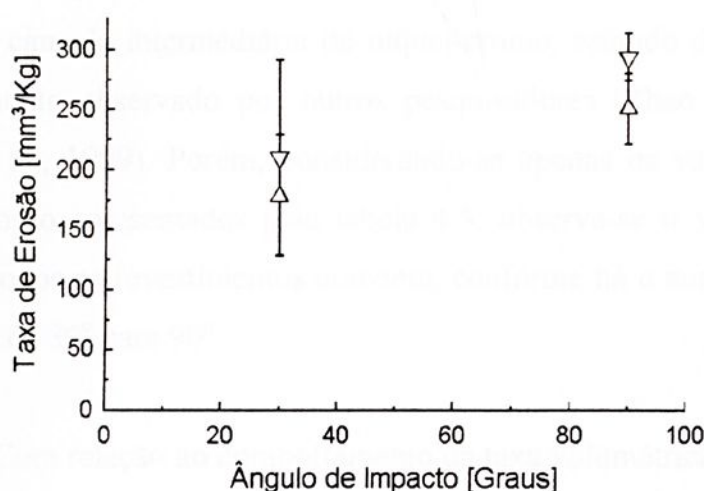


FIGURA 4.10 – Comparação das Taxas de Erosão apresentadas pelos revestimentos depositados em: (Δ) Substrato de Latão e (▽) Substrato de Latão com a camada intermediária de níquel-cromo, com nível de confiança de 95%.

De acordo com os valores médios obtidos para a taxa de volumétrica de erosão, com nível de confiança de 95%, apresentados na tabela 4.5, temos que o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão apresentou a melhor resistência a erosão e o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo apresentou a pior resistência a erosão, tanto no ângulo de impacto de 30°, quanto no ângulo de impacto de 90°.

Conforme o comportamento da taxa de erosão dos pares de revestimentos cerâmicos, apresentados pelas figuras 4.5 a 4.10, observa-se que:

1. Com relação ao comportamento da taxa volumétrica de erosão, com nível de confiança de 95%, em função do aumento do ângulo de impacto do fluxo aquoso de 30° para 90°, o valor da taxa de erosão cresce, com o aumento

do ângulo de impacto do fluido aquoso apenas no revestimento depositado em aço com a camada intermediária de níquel-cromo, estando de acordo com o comportamento observado por outros pesquisadores (Zhao *et al.*, 1999b e Nichols *et al.*, 1999). Porém, considerando-se apenas os valores médios da taxa de erosão apresentados pela tabela 4.5, observa-se o valor da taxa de erosão de todos os revestimentos aumenta, conforme há o aumento do ângulo de impacto de 30° para 90°.

2. Com relação ao comportamento da taxa volumétrica de erosão, com nível de confiança de 95% no ângulo de impacto de 30°, utilizando-se o método de Tukey de comparação de pares (Apêndice B), podemos afirmar com certeza que apenas o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão apresentou a melhor resistência ao desgaste erosivo do que o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo (figura 4.8). Nos demais pares analisados, não é possível afirmar com certeza, qual revestimento apresentou a melhor resistência ao desgaste erosivo.

3. Com relação a taxa de erosão, com nível de confiança de 95%, para o ângulo de impacto de 90°, utilizando-se o método de Tukey de comparação de pares (Apêndice B), podemos afirmar com certeza que o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão, e o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão com a camada intermediária apresentaram a melhor resistência ao desgaste erosivo do que o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço, com a camada intermediária de níquel-cromo (figuras 4.8 e 4.9). Nos demais pares analisados, não é possível afirmar qual revestimento apresentou a melhor resistência ao desgaste erosivo.



4.4 Resultados de microdurezas medidas na secção transversal da cratera de erosão para um ângulo de impacto de fluxo de 90°.

4.4.1 Microdureza medida nos substratos de aço e latão.

A tabela 4.6 apresenta os resultados das microdurezas com nível de confiança de 95%, medidas nos substratos de aço e de latão, nos quais o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria foi diretamente depositado. Os pontos de medição utilizados foram mantidos a uma distância constante, em uma linha perpendicular à interface entre o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e o substrato no centro da cratera de erosão, estando o ponto 0 sobre a interface entre o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e o substrato, e o ponto 1 é o mais próximo desta interface sobre o substrato. Os gráficos apresentados pelas figuras 4.11 e 4.12 ilustram os valores da microdureza no substrato em função da distância da interface do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria.

Análise estatística dos resultados de microdureza, em nível de confiança de 95%, obtidas na secção transversal no substrato de aço SAE 1010, conforme ilustrado na Figura 4.11, indica que as três primeiras medições (mais próximas da interface revestimento/substrato) apresentam valores semelhantes; que passam a decair progressivamente, a partir do quarto ponto de medição, mantendo valores constantes a partir do sexto ponto de medição. Isto indica que houve uma deformação subsuperficial do substrato de aço causada pelo impacto das partículas erosivas do fluxo líquido sobre o revestimento.

TABELA 4.6 – Resultados das Microdurezas medidas nos substratos de aço e de latão, com nível de confiança de 95%

Posição	Substrato			
	Aço		Latão	
	Média [Hv]	Desvio Padrão	Média [Hv]	Desvio Padrão
1	102,44	5,06	51,07	2,67
2	96,46	8,2	53,82	4,9
3	97,02	7,8	51,57	6,43
4	81,02	10,88	49,09	7,47
5	85,57	15,42	52,84	1,59
6	76,8	7,35	53,28	1,67
7	70,09	5,2	53,83	5,77
8	77,52	5,88	54,21	1,72
9	75,21	4,91	54,76	4,47
10	79,92	0,33	54,02	2,19

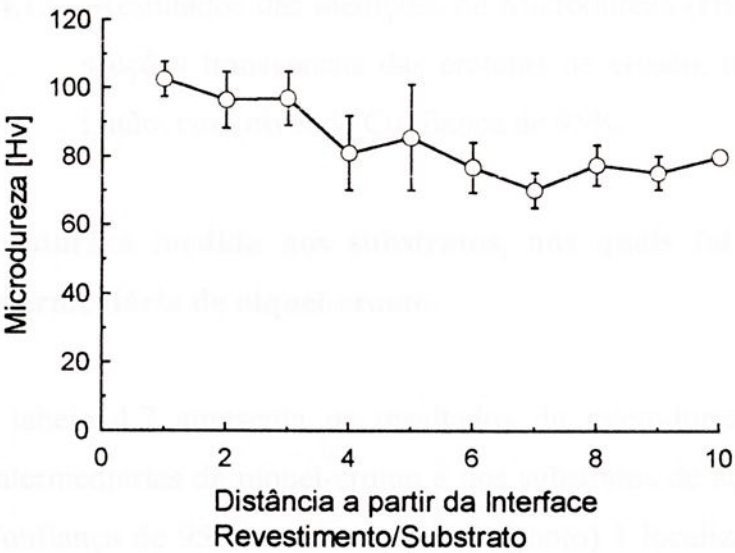


FIGURA 4.11 – Resultados das medições de Microdureza (Hv) efetuadas em secções transversais das crateras de erosão, no substrato de Aço SAE 1010, com nível de Confiança de 95%.

Os resultados da microdureza, para um nível de confiança de 95% obtidas na secção transversal do substrato de latão, conforme ilustrado pela Figura 4.12, não indicam uma alteração da interface do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria. Desta forma, não há uma deformação subsuperficial do substrato de latão causada pelo impacto das partículas erosivas do fluxo aquoso sobre o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria.

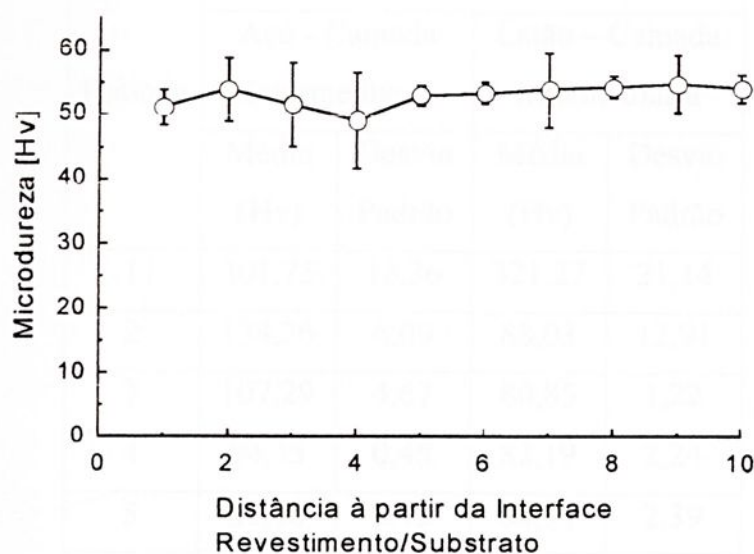


FIGURA 4.12 – Resultados das medições de Microdureza (Hv) efetuadas em secções transversais das crateras de erosão, no substrato de Latão, com nível de Confiança de 95%.

4.4.2 Microdureza medida nos substratos, nos quais foi depositado a camada intermediária de níquel-cromo.

A tabela 4.7 apresenta os resultados de microdureza obtidos nas camadas intermediárias de níquel-cromo e nos substratos de aço e latão, com nível de Confiança de 95%, sendo a posição (ponto) 1 localizada na camada intermediária de níquel-cromo e as demais no substrato.

Observa-se, dos resultados apresentados pela tabela 4.7 que o valor médio da microdureza apresentada pela camada intermediária de níquel-cromo

é muito maior do que os demais valores médios da microdureza apresentados pelos substratos de aço e de latão.

TABELA 4.7 – Resultados das Microdurezas medidas nas camadas intermediárias e nos substratos, com nível de confiança de 95%.

Posição	Amostra			
	Aço - Camada Intermediária		Latão – Camada Intermediária	
	Média (Hv)	Desvio Padrão	Média (Hv)	Desvio Padrão
1	301,75	15,36	321,27	21,14
2	134,26	6,09	88,03	12,91
3	107,29	4,67	80,85	1,22
4	94,35	0,45	82,19	2,24
5	80,90	3,45	80,94	2,39
6	81,70	3,12	81,36	0,45
7	80,77	3,23	77,70	7,47
8	80,68	3,00	77,18	2,00
9	80,84	2,73	79,26	8,62
10	79,09	2,95	82,19	2,85
11	80,77	2,86	85,18	16,51

As figuras 4.13 e 4.14 ilustram, respectivamente, o comportamento dos resultados das medidas de microdureza efetuadas na secção transversal do centro das crateras de erosão para os substratos de aço e de latão, com a camada intermediária de níquel-cromo. Estas medições foram efetuadas em pontos, cujas distâncias foram mantidas constantes, a partir da interface entre o revestimento e a camada intermediária. O ponto 0 localiza-se sobre a

interface entre ao revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e a camada intermediária de níquel-cromo. O ponto 1 localiza-se na camada intermediária, enquanto os demais (2 ao 11) no substrato, sendo o ponto 2 localizado próximo a interface entre o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria e o substrato.

O comportamento da microdureza em função da distância na secção transversal do centro da cratera de erosão, com nível de confiança de 95%, na camada intermediária de níquel-cromo e no substrato de aço, conforme ilustrado pela figura 4.13, indica um decréscimo da microdureza da camada intermediária de níquel-cromo para o substrato de aço e um decréscimo posterior da microdureza no substrato de aço. Isto indica que houve uma deformação subsuperficial da camada intermediária e do substrato de aço causada pelo impacto das partículas erosivas do fluxo líquido sobre o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria.

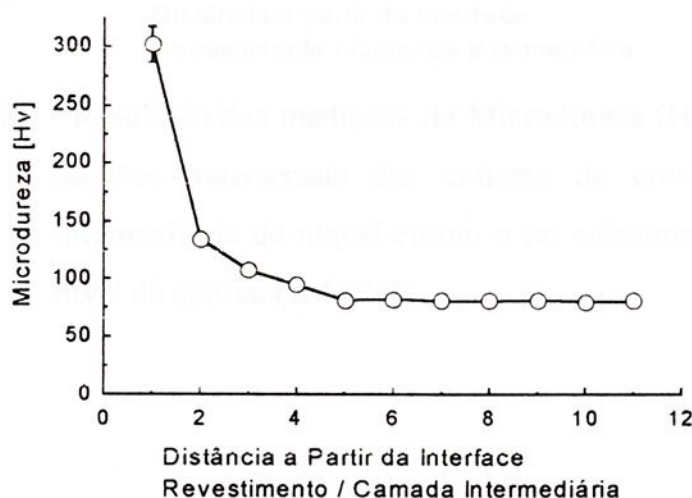


FIGURA 4.13 – Resultado das medições de Microdureza (Hv) efetuadas em secções transversais das crateras de erosão, na camada intermediária e no substrato de aço, com nível de confiança de 95%.

O comportamento da microdureza em função da distância na secção transversal da camada intermediária e do substrato de latão, conforme ilustrado na figura 4.14, indica um significativo decréscimo da camada intermediária para o substrato de latão, onde manteve-se praticamente constante. Desta forma, não houve uma deformação subsuperficial do substrato de latão causada pelo impacto das partículas erosivas do fluxo líquido sobre o revestimento cerâmico a base de zircônia-íttria.

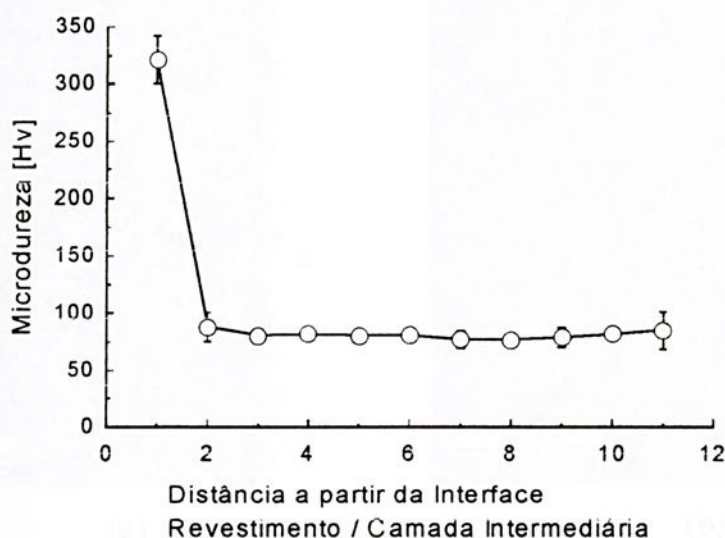


FIGURA 4.14 – Resultado das medições de Microdureza (Hv) efetuadas em secções transversais das crateras de erosão, na camada intermediária de níquel-cromo e no substrato de Latão, com nível de confiança de 95%.

4.5 Resultados da microscopia óptica

As figuras 4.15 e 4.16 ilustram respectivamente a secção transversal do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço e do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel cromo.

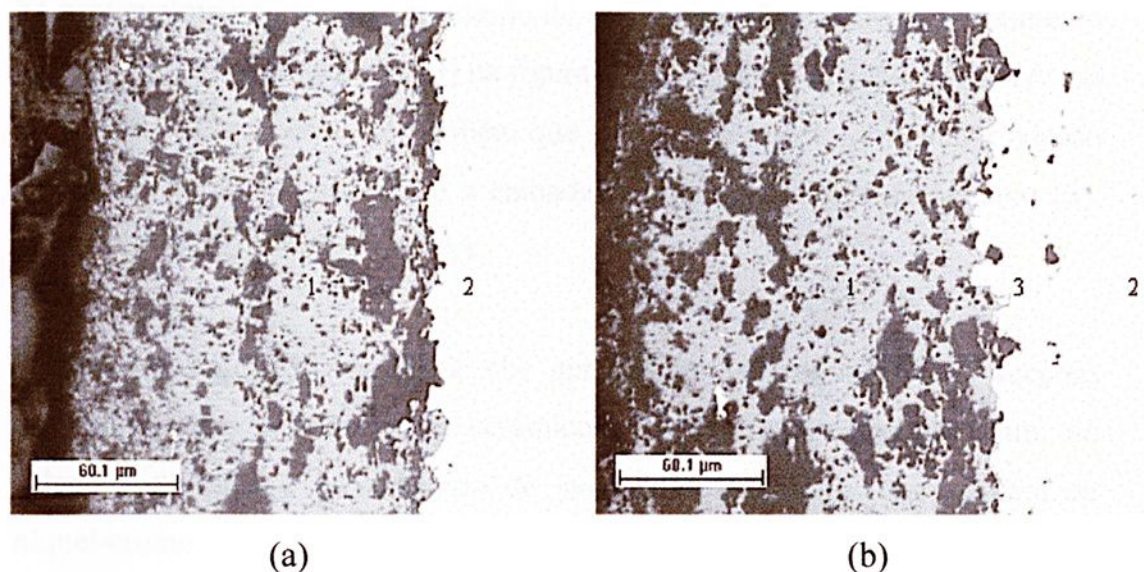


FIGURA 4.15 – Detalhe da secção transversal do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre (a) aço 1010 e (b) aço 1010 com a camada intermediária de níquel-cromo. Legendas : (1) revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria; (2) substrato e (3) camada intermediária

As figuras 4.15 (a) e (b) apresentam, respectivamente, micrografias da secção transversal dos revestimentos cerâmicos depositados em substratos de aço e de aço com a camada intermediária de níquel-cromo.

Comparando estas micrografias, observa-se que na secção transversal do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria (1) na figura 4.15(a) e 4.15 (b) há uma grande concentração de pequenos poros espalhada por toda a área

do revestimento, e a formação de vazios pela alta concentração de poros aleatoriamente distribuídos, porém concentrados em grande parte na interface entre o revestimento e o substrato de aço e o revestimento e a camada intermediária de níquel-cromo, respectivamente, sendo menor neste último.

Na interface entre o revestimento (1) e o substrato (2), na figura 4.15 (a) devido a alta densidade de vazios provenientes da concentração de poros há provavelmente uma menor adesão do que na interface entre o revestimento (1) e a camada intermediária (3) na figura 4.15 (b), onde os vazios ocorrem em menor intensidade. Nota-se também que há provavelmente uma maior adesão entre o substrato de aço (2) e a camada intermediária de níquel-cromo (3), conforme ilustra a figura 4.15 (b).

As figuras 4.16 (a) e (b) apresentam micrografias das secções transversais dos revestimentos cerâmicos depositados, respectivamente, no substrato de latão e no substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo.

Observa-se, da micrografia do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria na figura 4.16 (b) que há uma maior concentração de pequenos poros e vazios, em toda a extensão do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria (1) do que aquele ilustrado pela figura 4.16 (a).

A camada intermediária de níquel-cromo, conforme ilustrado pela figura 4.16 (b), tanto com o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria quanto com o substrato de latão aparenta não possuir a formação de vazios nas interfaces, proporcionando uma boa adesão. O mesmo fato observa-se para a interface do substrato de latão com o revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria, conforme ilustra a micrografia na figura 4.16 (a).

Tanto os pequenos poros quanto os vazios formados por um conjunto de poros podem provavelmente terem sido originados durante o processo de deposição do revestimento, indicando assim regiões onde não houve uma perfeita adesão entre o revestimento e o substrato ou uma perfeita coesão entre as lamelas.

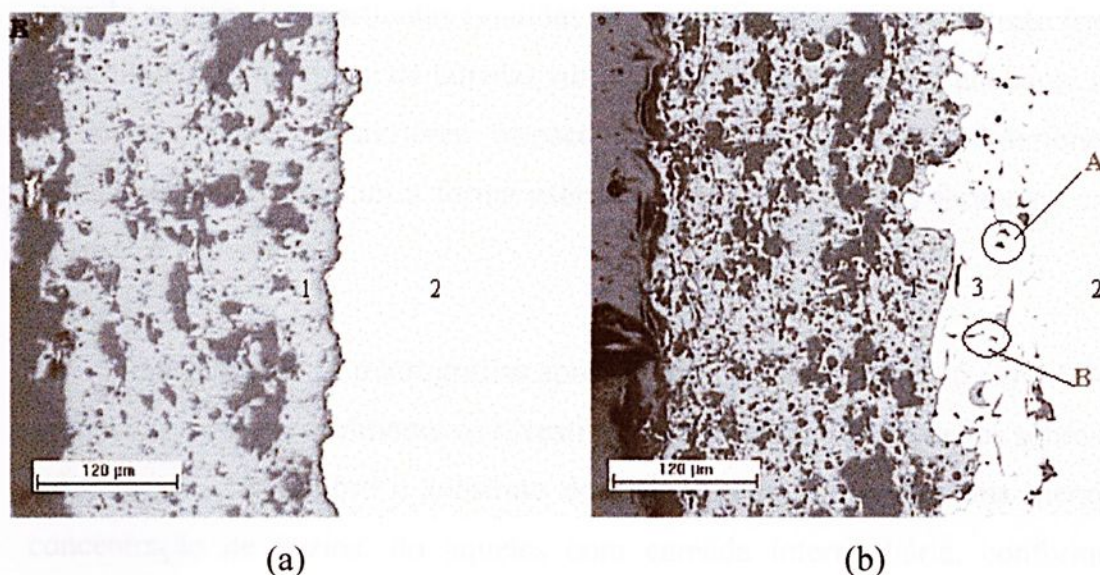


FIGURA 4.16 – Detalhe da secção transversal do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre (a) latão e (b) latão com a camada intermediária. Legendas : (1) revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria; (2) substrato e (3) camada intermediária

Na figura 4.16(b) podem ser visualizadas, no interior da camada intermediária, lamelas esféricas, que não tiveram uma perfeita adesão ao restante do depósito (detalhe A), tornando visível seus contornos, representando uma falha no processo de deposição. Também podem ser vistas grandes trincas por toda a camada de níquel-cromo, que podem ter surgido durante o processo de resfriamento (detalhe B), e que estão localizadas na interface entre as lamelas.

Conforme já observado (Fauchais et al., 1996), o formato esférico apresentado pelas lamelas origina-se de depósitos realizados em substratos aquecidos (c.300 °C), porém, como no presente caso, o depósito foi efetuado em substratos frios, este formato provavelmente deve ter origem no aquecimento superficial das camadas anteriores, já que estas lamelas esféricas são vistas principalmente na região central da camada intermediária. Assim, quando as primeiras partículas fundidas de níquel impactaram o substrato frio, assumiram a forma típica de lamelas surgidos em substratos frios, enquanto as partículas fundidas posteriores, impactando-se sobre as lamelas anteriores, ainda aquecidas, tomaram a forma esférica, típica de depósitos formados em substratos aquecidos.

Observando as micrografias apresentadas pelas figuras 4.15 (a) e 4.16 (a) nota-se que provavelmente os revestimentos cerâmicos depositados sobre o substrato de aço e sobre o substrato de latão devam apresentar uma menor concentração de vazios, do aqueles com camada intermediária, conforme ilustrados pelas figuras 4.15 (b) e 4.16 (b).

Observa-se também, que os revestimentos cerâmicos depositados sobre a camada intermediária de níquel-cromo, apresentados nas micrografias das figuras 4.15 (b) e 4.16 (b) apresentam uma interface similar ao do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria depositado sobre o substrato de latão, aparentando uma boa adesão ao mesmo. Entretanto, em relação ao substrato de aço, conforme ilustra a figura 4.15 (a), há uma grande concentração de vazios e uma provável má aderência do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria.

4.6 Resultado das microscopias eletrônicas de varredura

4.6.1 Microscopias eletrônicas de varredura da superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam as micrografias da superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria.

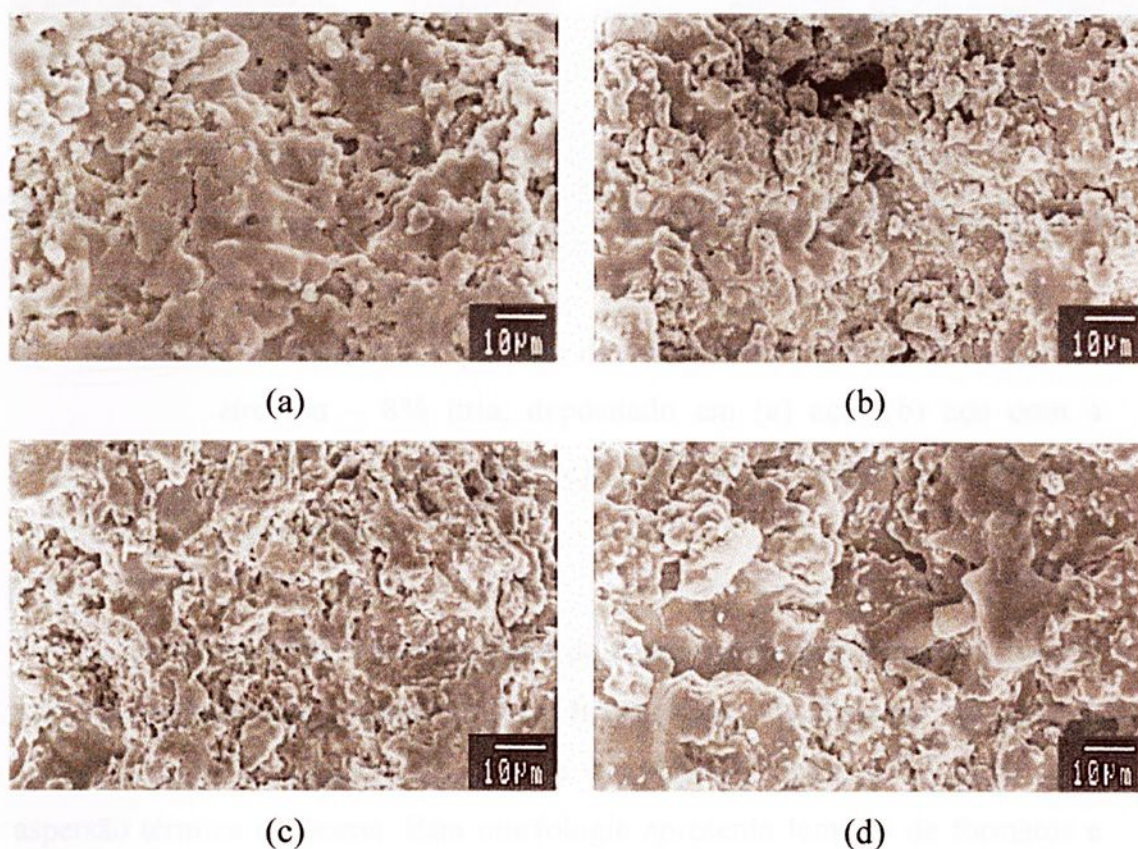


FIGURA 4.17 – Superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria, depositado em (a) aço, (b) aço com a camada intermediária (c) latão, e (d) latão com a camada intermediária.

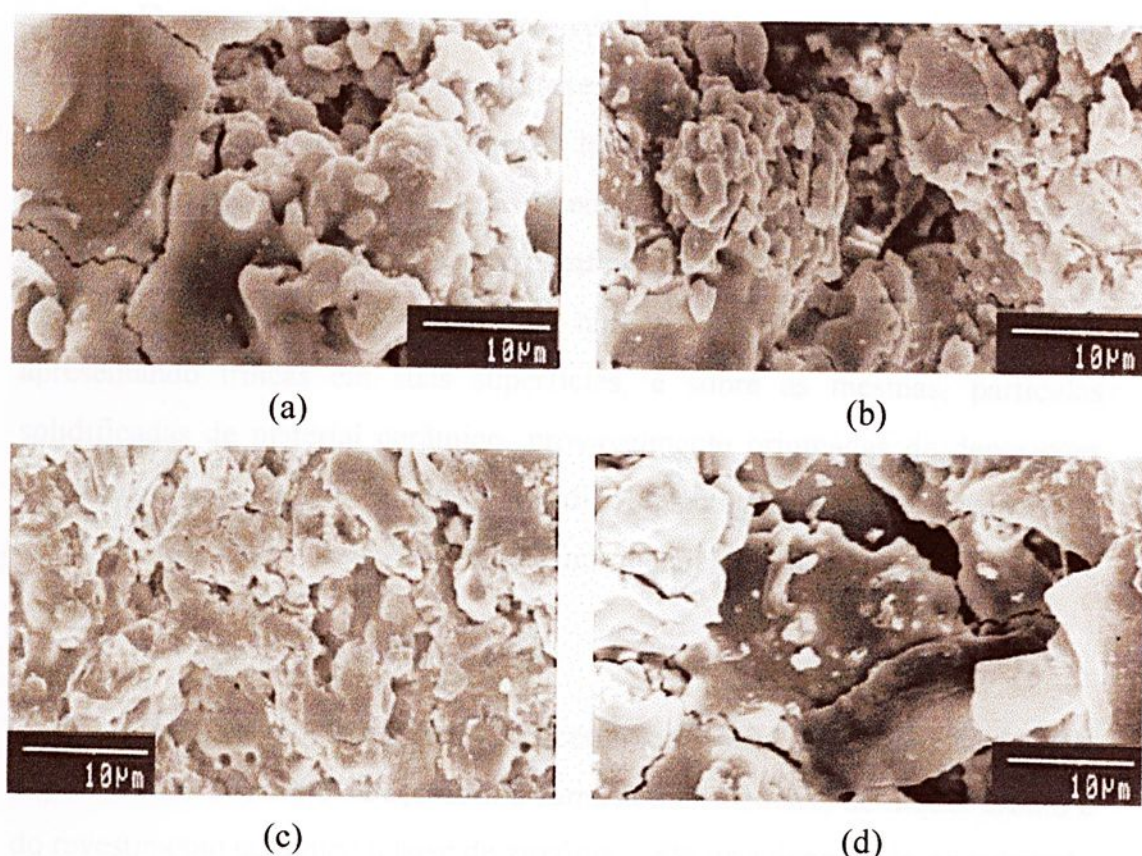


FIGURA 4.18 – Detalhe da superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria, depositado em (a) aço, (b) aço com a camada intermediária, (c) latão, e (d) latão com a camada intermediária.

As micrografias das superfícies dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, conforme ilustra a figura 4.17 e detalhes na figura 4.18, apresentam uma morfologia composta de lamelas, típica do depósito por aspersão térmica a plasma. Esta morfologia apresenta lamelas de formatos e tamanhos diferentes, basicamente composta de grandes lamelas deformadas plasticamente e pequenas lamelas, distribuídas de maneira não uniforme em toda a superfície, que apresenta crateras típicas da presença de vazios, formados durante o processo de deposição.

Da superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço e do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de latão com a camada intermediária de níquel conforme ilustram, respectivamente, as micrografias nas figuras 4.17 (a) e 4.17 (d), e detalhes nas micrografias nas figuras 4.18 (a) e 4.18 (d), observa-se um tamanho maior de lamelas distribuídas aleatoriamente, apresentando trincas em suas superfícies, e sobre as mesmas, partículas solidificadas de material cerâmico, provavelmente originadas de deposições subsequentes, nas quais o material fundido desintegrou-se sobre a superfície devido ao impacto. Observa-se ainda uma pequena concentração de poros e vazios.

Da superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo e do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de latão conforme ilustra, respectivamente, as micrografias nas figuras 4.17 (b) e 4.17 (c) e detalhes nas micrografias nas figuras 4.18 (b) e 4.18 (c), observa-se lamelas menores, distribuídas aleatoriamente, com uma concentração maior de poros e vazios.

As figuras 4.19 e 4.20 apresentam as micrografias da superfície desgastada do revestimento a base de zircônia-ítria, para um ângulo de 90° , de acordo com o substrato utilizado.

Da superfície desgastada, sob um ângulo de impacto de 90° , do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado nos substratos de aço com a camada intermediária de níquel-cromo e de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, conforme ilustra, respectivamente as micrografias nas figuras 4.19 (b) e 4.19 (d) e detalhes nas figuras 4.20 (b) e 4.20 (d), observa-se as cavidades produzidas pela erosão, com a presença de

lamelas fraturadas e a formação de lamelas em degraus, indicando a remoção das lamelas mais superficiais durante o processo erosivo.

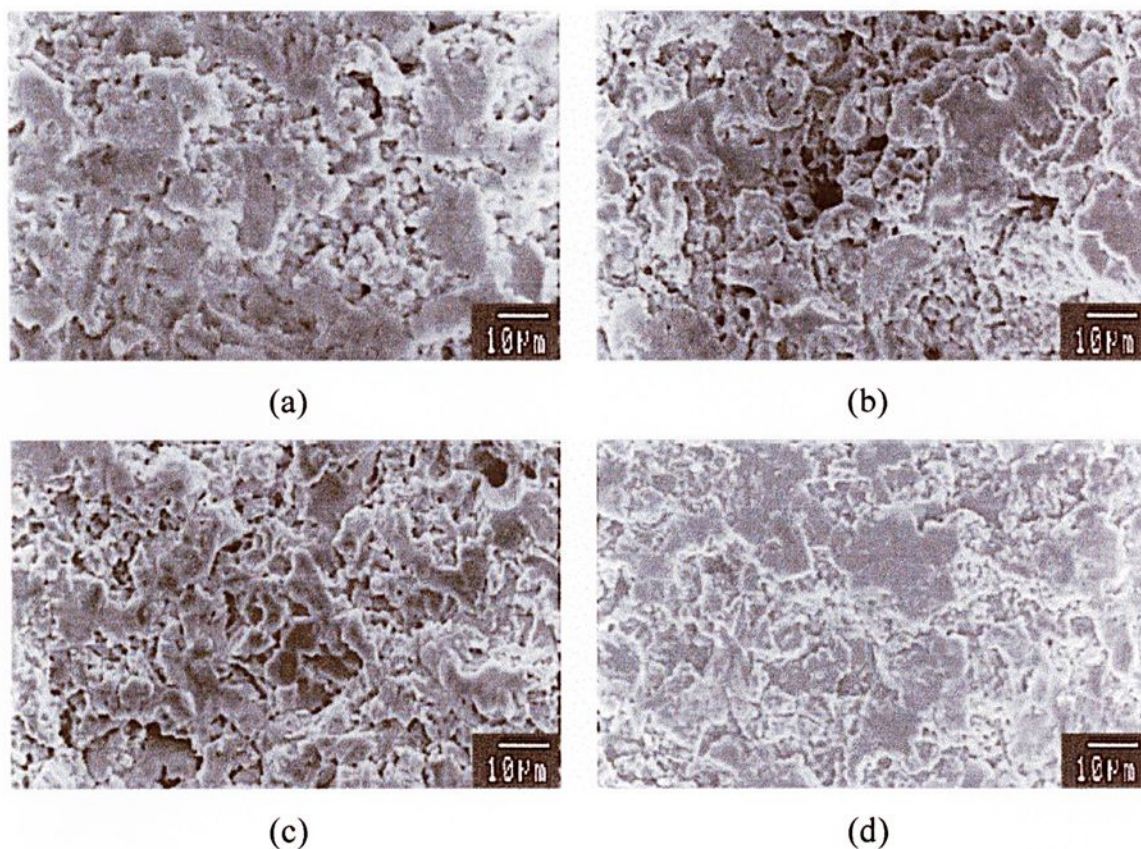


FIGURA 4.19 – Superfície da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em (a) aço, (b) aço com camada intermediária, (c) latão, e (d) latão com a camada intermediária.

Da superfície desgastada, sob um ângulo de impacto de 90° , do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado nos substratos de aço e de latão, conforme ilustra, respectivamente, as micrografias nas figuras 4.19 (a) e 4.19 (c), e detalhes nas figuras 4.20 (a) e 4.20 (c), observa-se em ambos os revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, cavidades produzidas pela erosão, com lamelas fraturadas e no revestimento cerâmico a

base de zircônia – 8% ítria depositado em substrato de latão, verifica-se também a presença de degraus de lamelas.

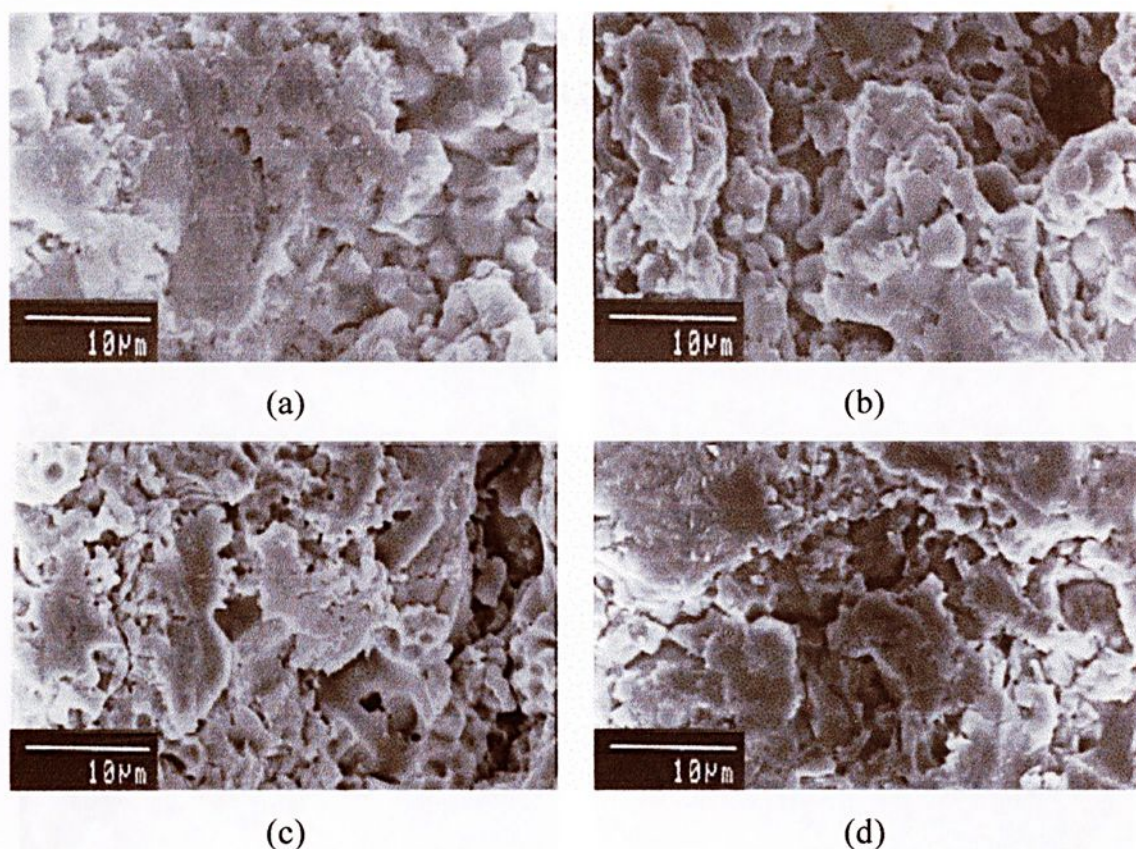


FIGURA 4.20 – Detalhe da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em (a) aço e (b) aço com camada intermediária, (c) latão, e (d) latão com a camada intermediária.

Quando o ângulo de impacto do fluxo aquoso foi de 30° , não foi observado a formação de uma cratera, como a vista quando o ângulo de impacto foi de 90° , mas uma faixa de material removido na superfície do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria. Foi realizada micrografias por microscopia eletrônica de varredura apenas do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço, por ser o que apresentou a faixa de material removido mais nítida.

As micrografias apresentadas na figura 4.21 (a) e (b) ilustram a superfície erodida do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em substrato de aço, com o ângulo de impacto das partículas no fluxo aquoso de 30° e 90° . As figuras 4.21 (c) e (d) apresentam detalhes das figura 4.21 (a) e (b), respectivamente.

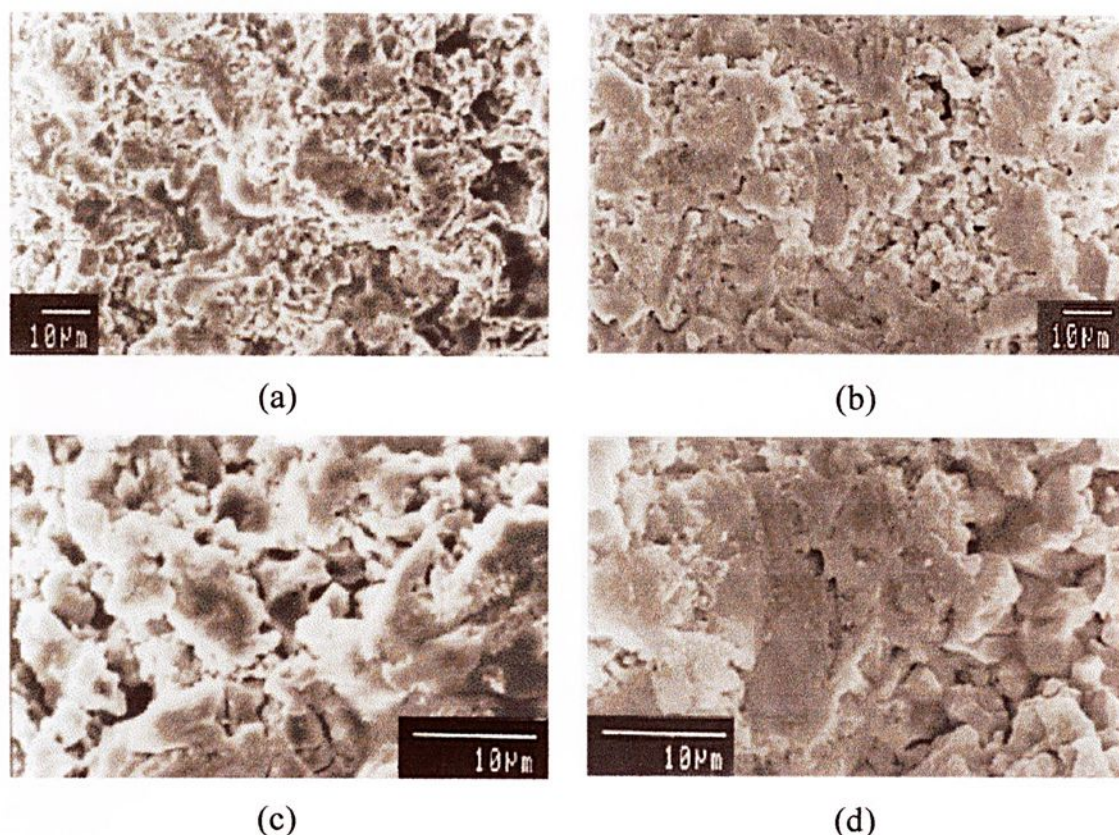


FIGURA 4.21 – Superfície erodida do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço. (a) e (c) Ângulo de impacto das partículas no fluxo aquoso de 30° , (b) e (d) Ângulo de impacto das partículas no fluxo aquoso de 90°

Da superfície desgastada do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço, conforme ilustrado na figura 4.21 (a) e detalhe na figura 4.21 (c), para um ângulo de impacto de 30° , observa-se que há uma remoção de material da superfície e cavidades entre as lamelas,

que apresentam-se fraturadas, como também observadas na micrografia na figura 4.21 (b) e detalhe na figura 4.21 (d), para o ângulo de impacto de 90° .

4.6.2 Microscopias eletrônicas de varredura das secções transversais das crateras de erosão.

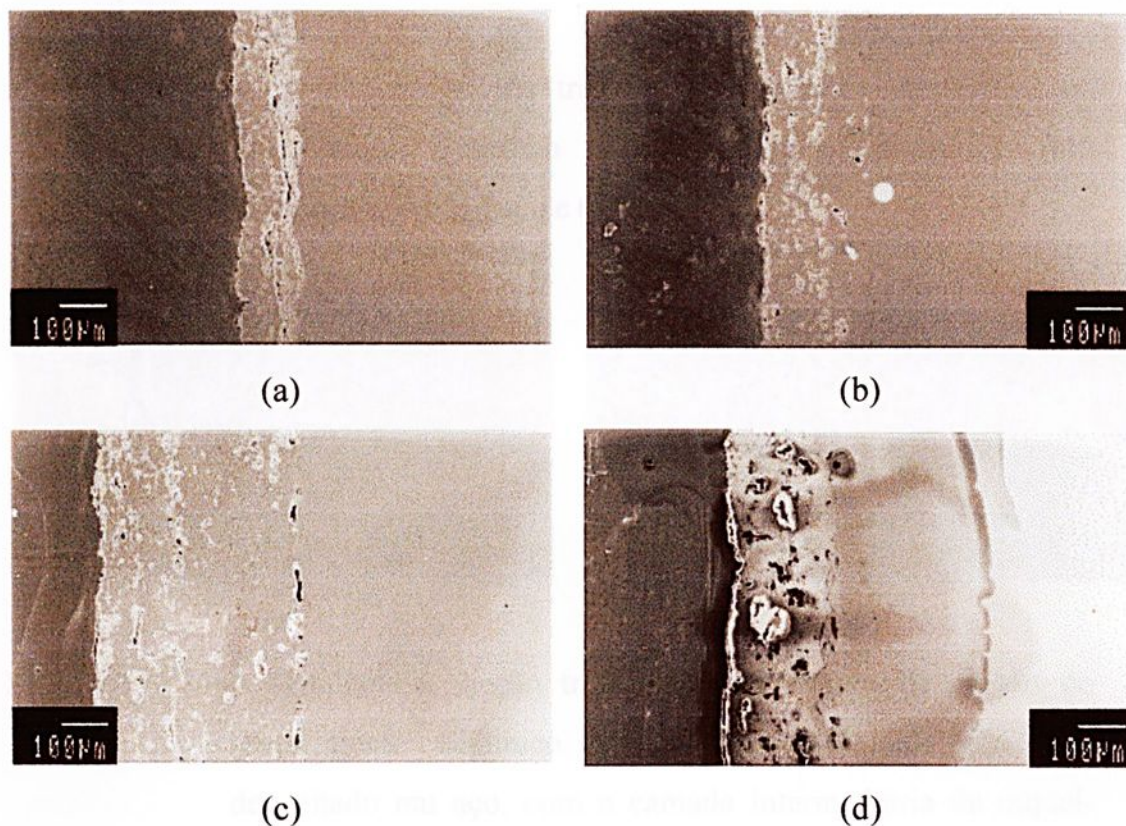


FIGURA 4.22 – Secções transversais do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria, depositado em (a) aço, (b) aço com camada intermediária de níquel-cromo, (c) latão, e (d) latão com a camada intermediária de níquel-cromo.

A figura 4.22 apresenta micrografias das secções transversais da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria, de acordo com o substrato utilizado e as figuras 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam detalhes das micrografias apresentadas pela figura 4.22.

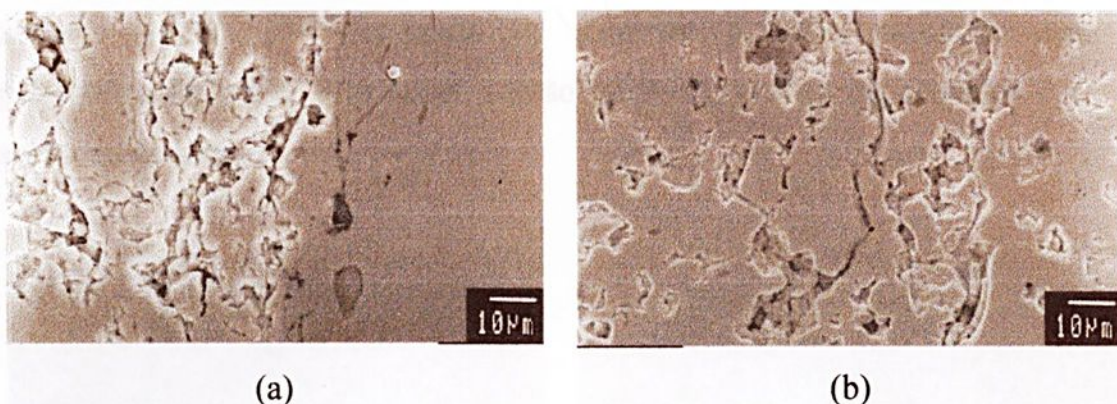


FIGURA 4.23 – Detalhe da secção transversal da cratera de erosão, do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositados em (a) aço e (b) latão.

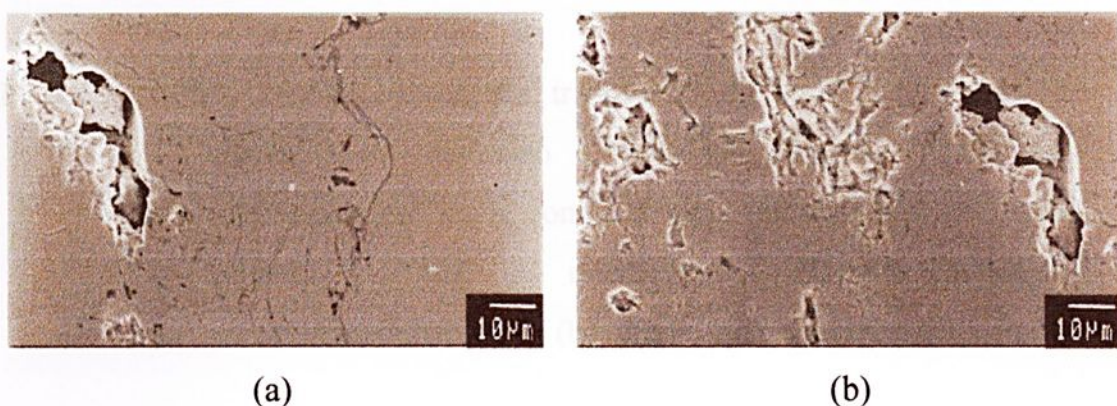


FIGURA 4.24 – Detalhe da secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em aço, com a camada intermediária de níquel-cromo. (a) interface revestimento/camada intermediária/substrato, (b) interior do revestimento.

Das superfícies transversais da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço e de latão, ilustradas respectivamente, pelas micrografias nas figuras 4.22 (a) e (c) e detalhes nas figuras 4.23 (a) e (b) observa-se uma grande concentração de poros e vazios na secção transversal do revestimento cerâmico, sendo que na interface entre o revestimento e o substrato, observa-se vazios contornando a linha da interface, em maior quantidade no revestimento cerâmico a base de

zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço, indicando que provavelmente houve uma maior adesão entre o revestimento cerâmico e o substrato de latão.

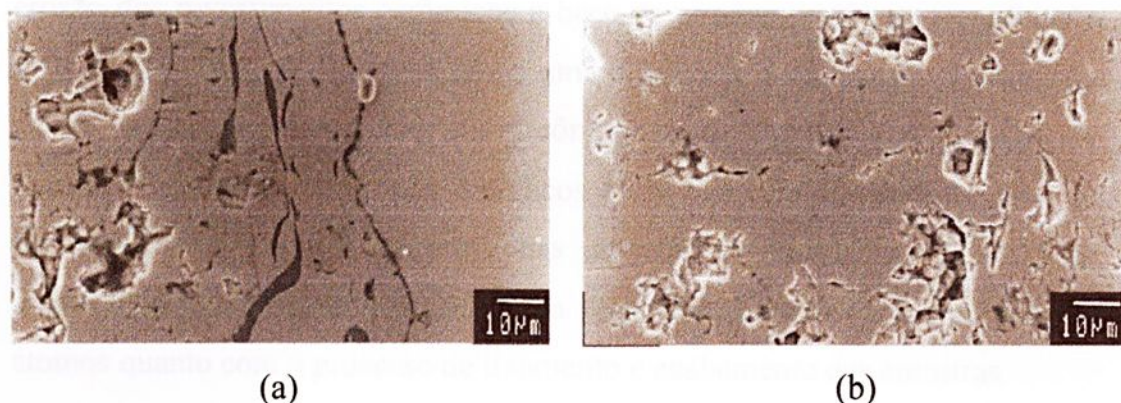


FIGURA 4.25 – Detalhe da secção transversal da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em latão, com a camada intermediária de níquel-cromo. (a) interface revestimento/camada intermediária/substrato, (b) interior do revestimento.

Das superfícies transversais da cratera de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo e de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, ilustradas respectivamente, pelas micrografias nas figuras 4.22 (b) e (d) e detalhes nas figuras 4.24 (a) e (b) e 4.25 (a) e (b) observa-se uma grande concentração de poros e vazios na secção transversal do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria, porém nas interfaces entre o revestimento cerâmico e a camada intermediária e entre a camada intermediária e o substrato, não se observa vazios. No detalhe da interface entre o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria e a camada intermediária de níquel – cromo (figura 4.25a), observa-se nitidamente os vazios, anteriormente observados na micrografia ótica (figura 4.16b).

4.7 Considerações gerais

A microanálise realizada nas secções transversais das crateras de erosão dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria em função do substrato utilizado, mostrou haver uma difusão de átomos dos materiais do revestimento cerâmico a base de zircônia-ítria, da camada intermediária de níquel-cromo e dos substratos metálicos entre eles, em pontos próximos às interfaces. Em pontos distantes das interfaces, migrações de zircônia observadas nos substratos tanto podem estar relacionados com a difusão de átomos quanto com o processo de lixamento e acabamento das amostras.

De acordo com os valores médios da taxa volumétrica de erosão, apresentados pela tabela 4.5, podemos observar que a taxa de erosão de todos os revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, em função do substrato utilizado aumenta, com o aumento do ângulo de impacto das partículas sólidas contidas no fluxo aquoso.

Mas, analisando os gráficos nas figuras 4.5 a 4.10, que apresentam os valores da taxa volumétrica de erosão, com nível de confiança de 95%, comparando-se pares de revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria de acordo com o substrato utilizado, observa-se que apenas o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em aço com a camada intermediária de níquel-cromo demonstrou ter a sua taxa de erosão aumentada de acordo com o aumento do ângulo de impacto do fluxo líquido.

De acordo com a tabela 4.5, utilizando-se apenas os valores médios da taxa volumétrica de erosão, observou-se a seguinte relação, em ambos os ângulos de impacto, para a taxa de erosão dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, de acordo com o substrato utilizado:

Latão < Latão/Camada Intermediária < Aço < Aço/Camada Intermediária

Da relação acima, nota-se que os revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria depositados nos substratos de latão apresentaram a melhor resistência a erosão do que os revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria depositados nos substratos de aço, mas a presença da camada intermediária de níquel - cromo, em ambos os substratos, aumenta a taxa de erosão, diminuindo desta forma a resistência a erosão.

Através da análise estatística pelo método de Tukey, efetuada na comparação de pares de revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, conforme os gráficos nas figuras 4.5 a 4.10, observa-se que, para o ângulo de impacto do fluxo aquoso com partículas sólidas de 30° , apenas o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de latão apresentou a melhor resistência a erosão do que o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo. Para o ângulo de impacto do fluxo aquoso com partículas sólidas de 90° , o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado sobre o substrato de latão e sobre o substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo apresentaram a melhor resistência a erosão do que o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado sobre o substrato de aço com a camada intermediária de níquel-cromo.

Uma explicação para o comportamento dos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, em função do substrato utilizado, com relação a sua taxa de erosão, pode ser dada pelos valores de microdureza apresentados pelas tabelas 4.6 e 4.7 e pelos gráficos nas figuras 4.11 a 4.14, com nível de confiança de 95 %.



Observou-se que no substrato de latão (figura 4.12), não houve uma deformação subsuperficial, mantendo constante sua microdureza. A maior ductilidade apresentado pelo substrato de latão fez com que o mesmo atuasse com um efeito “amortecedor”, absorvendo elasticamente a energia produzida pelo impacto do fluxo aquoso, durante o processo erosivo. Este efeito “amortecedor” amenizou o impacto, permitindo que a remoção de material do revestimento fosse menor, diminuindo sua taxa de erosão.

No substrato de aço (figura 4.11), foi observada uma deformação subsuperficial, aumentando sua microdureza local. A menor ductilidade do aço, com relação ao latão, fez com que o efeito “amortecedor” fosse menor, com a absorção da energia de impacto passando de uma fase elástica para plástica, causando a deformação subsuperficial, permitindo uma maior remoção de material do revestimento, aumentando sua taxa de erosão.

Observou-se também que a microdureza na camada intermediária de níquel-cromo (figuras 4.13 e 4.14) é muito maior do que em ambos os substratos. Este maior valor de microdureza fez com que a camada intermediária de níquel-cromo atuasse como uma barreira, diminuindo o efeito “amortecedor” em ambos os substratos, provocando o aumento na taxa de erosão nos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria, cuja deposição foi feita sobre ela.

Das micrografias das secções transversais das crateras de erosão, obtidas por microscopia óptica (figuras 4.15 e 4.16) e por microscopia eletrônica de varredura (figuras 4.22 a 4.25) observa-se que, provavelmente, tanto o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em aço com a camada intermediária de níquel-cromo, quanto o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado em latão, que apresentaram respectivamente a maior e a menor taxa de erosão, apresentam uma menor

concentração de poros e vazios no revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria e uma boa adesão entre as interfaces revestimento / camada intermediária e revestimento / substrato.

Já nos revestimentos cerâmicos a base de zircônia – 8% ítria depositados em aço e em latão com a camada intermediária de níquel-cromo, que apresentaram valores intermediários da taxa de erosão, observa-se que provavelmente há uma concentração maior de poros e vazios na secção transversal do revestimento cerâmico. No caso do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço, há uma alta densidade de vazios próximo a interface entre o revestimento e o substrato, indicando regiões de baixa adesão, e no caso do revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de latão com a camada intermediária de níquel-cromo, observa-se defeitos originados do processo de deposição da camada intermediária, provocando vazios sob a forma de contornos entre as lamelas da camada intermediária.

Estas duas microestruturas apresentadas pelas secções transversais das crateras de erosão podem estar relacionadas com a grande dispersão apresentada pela taxa de erosão, com nível de confiança de 95 % (tabela 4.5), apresentada pelos gráficos nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.9.

As micrografias das superfícies erodidas (figuras 4.19 e 4.20) com o ângulo de impacto do fluxo aquoso de 90°, apresentam a formação de cavidades produzidas pela erosão, com lamelas fraturadas e/ou removidas pelo impacto do fluxo aquoso, como também observado por outros pesquisadores (Lathabai *et al.*, 1998, Xia *et al.*, 1999 e Nichols *et al.*, 1999), além da presença de lamelas empilhadas, indicando a remoção das lamelas mais superficiais durante o processo.

Nas micrografias da superfície erodida com o ângulo de impacto de 30° para o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado no substrato de aço (figura 4.21 a, c) também é observado a formação de cavidades com lamelas fraturadas e/ou removidas, mas não a formação de uma cratera de erosão, indicando que a remoção de material foi menor.

O mecanismo de remoção de material observado é o mesmo, nos revestimentos depositados a base de zircônia – 8% ítria em todos os tipos de substrato e ângulos de impacto analisados, indicando que a influência do substrato na taxa de erosão, não influencia efetivamente o mecanismo de erosão atuante.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados da erosão por fluxo aquoso com partículas sólidas para o revestimento cerâmico a base de zircônia – 8% ítria depositado por aspersão térmica a plasma sobre os substratos de aço SAE 1010 e de latão e sobre uma camada intermediária de níquel-cromo, previamente depositada por aspersão térmica a plasma sobre os substratos de aço SAE 1010 e de latão, conforme parâmetros adotados e outras análises adicionais, permitiu concluir que:

- a) A camada intermediária de níquel-cromo demonstrou melhorar a adesão entre o revestimento cerâmico a base de zircônia - 8% ítria e os substratos de aço e de latão. Entretanto a maior dureza apresentada pela camada intermediária de níquel-cromo, abaixo do revestimento cerâmico a base de zircônia - 8% ítria refletiu em uma maior taxa de erosão, tanto para o ângulo de impacto do fluxo aquoso por partículas sólidas de 30° quanto de 90°.
- b) A ductilidade do substrato influenciou, efetivamente, os resultados da taxa de erosão, em associação com a microestrutura apresentada pelos revestimentos cerâmicos e com a adesão entre o revestimento e o substrato.
- c) O endurecimento do substrato de aço, próximo a interface com o revestimento cerâmico de zircônia - 8% ítria refletiu em uma maior taxa de erosão em ambos os ângulos de impacto do fluxo aquoso por partículas sólidas.
- d) Observa-se uma tendência de crescimento da taxa de erosão do revestimento cerâmico a base de zircônia - 8% ítria, com o aumento do ângulo de impacto do fluxo aquoso por partículas sólidas de 30° para 90°.

- e) O revestimento cerâmico a base de zircônia - 8% ítria depositado sobre o substrato de latão apresentou a maior resistência a erosão por fluxo aquoso com partículas sólidas, tanto para o ângulo de impacto de 30° quanto para 90° .
- f) O mecanismo de desgaste atuante do revestimento cerâmico a base de zircônia - 8% ítria, tanto em ângulo de impacto do fluxo aquoso de 30° , quanto de 90° , foi a remoção e/ou fratura das lamelas.



6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar o comportamento da taxa de erosão de outros revestimentos cerâmicos depositados por aspersão térmica a plasma, ou outras técnicas de deposição, sobre as mesmas condições de ensaio, a fim de comparação com os resultados obtidos neste trabalho.
- b) Utilizar outras técnicas de análise microestrutural e de captação de imagens, tanto por microscopia ótica quanto por microscopia eletrônica de varredura, que permitam uma melhor caracterização do revestimento cerâmico.
- c) Analisar a influência de revestimentos cerâmicos duplos sobre a taxa de erosão por fluxo líquido e gasoso.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBADE, N. P. *Erosão Por Partículas Sólidas em Meio aquoso do Aço API 5LX65 nas Condições como Fornecido e Temperado Intercriticamente com Alta Taxa de Resfriamento*. Guaratinguetá, 1999. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.

AMERICAN WELDING SOCIETY *Thermal Spraying – Prattice, Theory and Application*. Miami: AWS Inc., 1985. 184p.

BIANCHI, L., DENOIRJEAN, A., BLEIN, F., FAUCHAIS, P. Microstrutural investigation of plasma-sprayed ceramic splats. *Thin Solid Films*, v.299, p. 125 – 135, 1997.

BIANCHI, L., LEGER, A.C., VARDELLE, M., VARDELLE, A., FAUCHAIS, P. Splat formation and cooling of plasma-sprayed zirconia. *Thin Solid Films*, v. 305, p. 35 – 47, 1997.

BLAU, P.S. *Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication*. In ASM Handbook - Friction, Lubrication and Wear Technology, USA: ASM, v. 18, p. 1- 21, 1995.

BOZZI, A. C. *Abrasão a Três Corpos de Recobrimentos de WC-12% Co Depositado por Aspersão Térmica*. Uberlândia, 1998. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Uberlândia.



CALLISTER JR., WILLIAM D. *Materials Science and Engineering – An Introduction*, New York : John Wiley and Sons, Inc., 5TH Edition, 2000, 871 p.

DING, C., TONG, Z., DONGSHENG, Y. Properties and applications of plasma-sprayed ceramic coatings. in Suryanarayanan, R. *Plasma Spraying – Theory and Application*, Cingapura: World Scientific Publishing Co, p. 163 – 175, 1993.

ERICKSON, L.C., WESTERGARD, R., WIKLUND, U., AXÉN, N., HAWTHORNE, H.M., HOGMARK, S. Cohesion in plasma-sprayed coatings – a comparison between evaluation methods. *Wear*, v. 214, p. 30 – 37, 1998

FANG, Q., XU, H., SIDKY, P.S., HOCKING, M.G. Erosion of ceramic materials by a sand/water slurry jet. *Wear*, v. 224, p. 183 – 193, 1999.

FANG, Q., SIDKY, P.S., HOCKING, M.G. Microripple formation and removal mechanism of ceramic materials by solid-liquid slurry erosion. *Wear*, v. 223, p. 93 – 101, 1998.

FAUCHAIS, P. VARDELLE, M., VARDELLE, A., BIANCHI, L., LÉGER, A.C. Parameters controlling the generation and properties of plasma sprayed zirconia coatings. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, v.16, p. 99S – 125S, 1996.

FINNIE, I. Some Reflections on the past and future of erosion, *Wear*, v. 186 – 187, p. 1 – 10, 1995.



FUNKE, C., MAILAND, J.C., SIEBERT, B., VAßEN, R., STOVER, D. Characterization of ZrO_2 wt% Y_2O_3 thermal barrier coatings with different porosities and FEM analysis of stress redistribution during thermal cycling of TBCs. *Surface and Coatings Technology*, v. 94 – 95, p. 106 – 111, 1997.

GORDON England, *Nature of Thermal Spray Coatings* [online] Inglaterra, 31 de Maio de 2000. Available from World Wide Web :[URL:HTTP://homepage.dtn.ntl.com/gordon.english/tsc.htm](http://homepage.dtn.ntl.com/gordon.english/tsc.htm).

HARMSWORTH, P.D., STEVENS, R. Microstructure of zirconia-yttria plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Journal of Material Science*, v. 27, p. 616 – 624, 1992.

HERMAN, H., Plasma-sprayed coatings. *Scientific American*, v. 256, p. 78 – 83, 1988.

JAHANMIR, S. *Friction And Wear Of Ceramics*. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc., ed. 1, 1994

LATHABAI, S, PENDER, D.C. Microstructural influence in slurry erosion of ceramics. *Wear*, v. 189, p. 122 – 135, 1995.

LATHABAI, S., OTTMÜLLER, M., FERNANDEZ, I. Solid particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings. *Wear*, v. 221, p. 93 – 108, 1998.

LIN, F., SHAO, H. The effect of impingement angle on slurry erosion. *Wear*, v. 141, p. 279 – 289, 1991.

McPHERSON, R., SHAFER, B.V. Interlamellar contact within plasma-sprayed coatings. *Thin Solid Films*, v. 97, p. 201 – 204, 1982.

NICHOLS, J.R., DEAKIN, M.J., RICKERBY, D.S. A comparison between the erosion behaviour of thermal spray and electron beam physical vapour deposition thermal barrier coatings. *Wear*, v. 233 – 235, p. 352 – 361, 1999

OHMORI, A., LI, C.J., ARATA, Y. Influence of plasma spray conditions on the structure of Al_2O_3 Coatings. *Transactions of JWRI*, v. 19 n. 2, p. 99 – 110, 1990.

OHMORI, A., LI, C.J. The structure of thermally sprayed ceramic coatings and its dominant effect on the coating properties. in Suryanarayanan, R. Plasma Spraying – Theory and Application, Cingapura: World Scientific Publishing Co, p. – , 1993.

SCHWINGEL, D., TAYLOR, R., HAUBOLD, T., WIGREN, J., GUALCO, C. Mechanical and thermophysical properties of thick PYSZ thermal barrier coatings: correlation with microstructure and spraying parameters. *Surface and Coating Technology*, v. 108-9, p. 99 – 106, 1998.

WESTERGARD, R, ERICKSON, L.C., AXÉN, N., HAWTHORNE, H.M., HOGMARK, S. The erosion and abrasion characteristics of alumina coatings plasma sprayed under different spraying conditions. *Tribology International*, v. 31 n. 5, p. 271 – 279, 1998.

XIA, Z., ZHANG, X., SONG, J. Erosion-resistance of plasma sprayed coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.8, p. 716 – 718, 1999.

ZHAO, H.X., YAMAMOTO, M., MATSUMURA, M. Slurry erosion properties of ceramic coatings and functionally gradient materials. *Wear*, v. 186 – 7, p. 473 – 479, 1995.

ZHAO, H.X., GOTO, H., MATSUMURA, M., TAKAHASHI, T., YAMAMOTO, M. Slurry erosion of plasma-sprayed ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 115, p. 123 – 131, 1999.

ZHAO, H.X., YABUKI, A., MATSUMURA, M., TAKAHASHI, T., YAMAMOTO, M. Slurry erosion properties of ceramics coatings. *Wear*, v. 233 – 235, p. 608 – 614, 1999.

APÊNDICE A

TABELA A – Valor médio da taxa de erosão por perda de massa, em função do ângulo de impacto (em graus) e do material de substrato utilizado.

MATERIAL	30°		90°	
	Média (mg)	Desvio Padrão	Média (mg)	Desvio Padrão
Aço	25,75	3,10	34,75	7,89
Aço/Camada Intermediária	28,31	2,13	43,88	3,81
Latão	19,25	4,02	27,06	2,37
Latão/Cam. Intermediária	22,69	6,46	31,69	1,55

APÊNDICE B

Têm-se duas médias (X_1 e X_2) de duas amostragens diferentes.

Pelo Método de Tukey, se a diferença entre as médias, for superior a ZETA, ou seja : $|X_1 - X_2| > ZETA$, então consideramos as médias X_1 e X_2 diferentes.

A expressão ZETA segue :

$$ZETA = q_{k,v,\alpha} \sqrt{\frac{S_R^2}{n}}$$

sendo : k = número de níveis, n = tamanho da amostra, $v = k(n-1)$, $q_{k,v,\alpha}$ a Amplitude Studentizada e S_R^2 = Média das variâncias em cada amostragem

