

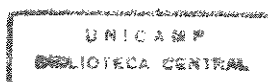
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Paulo Villani
Marques E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 13/12/96.
Roseana da Exaltação Trevisan
ORIENTADOR

**DANO CAVITACIONAL EM REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA**

Autor: Paulo Villani Marques
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Roseana da Exaltação Trevisan

Campinas, dezembro de 1996



016.070.k6

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

**DANO CAVITACIONAL EM REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA**

**Autor: Paulo Villani Marques
Orientadora: Prof^{ma}. Dr^a. Roseana da Exaltação Trevisan**

**Tese apresentada como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica**

Campinas, dezembro de 1996

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M348d	Marques, Paulo Villani Dano cavitacional em revestimentos depositados por aspersão térmica a chama / Paulo Villani Marques. -- Campinas, SP: [s.n.], 1996. Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Metalização - Processos. 2. Revestimentos protetores. 3. Cavitação. 4. Turbinas hidráulicas. I. Trevisan, Roseana da Exaltação. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.
-------	--

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

DANO CAVITACIONAL EM REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA

Autor: Paulo Villani Marques
Orientadora: Profª. Drª. Roseana da Exaltação Trevisan

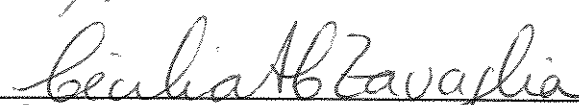
Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica. Aprovada em 13/12/96, por:


Profª. Drª. Roseana da Exaltação Trevisan - UNICAMP


Profª. Drª. Maria Helena Robert - UNICAMP


Prof. Dr. Sérgio Tonini Button - UNICAMP


Prof. Dr. Nelson Guedes Alcântara - UFSCAR


Profª. Drª. Cecília Amélia Carvalho Zavaglia - UNICAMP

Campinas, dezembro de 1996.

**Para Vitória e Paula, esposa e
filha, com todo meu amor ...**

Agradecimentos

Muitas foram as pessoas e entidades que contribuíram para que esse trabalho chegasse ao seu final, sendo quase impossível enumerá-las. Contudo, sob pena de cometer injustiças, gostaria de assinalar meu reconhecimento especial

à Prof^ª. Dr^ª. Roseana da Exaltação Trevisan, pela orientação e amizade;

aos professores e funcionários técnicos e administrativos da FEM, pelo apoio e colaboração;

aos colegas e aos funcionários técnicos e administrativos da UFMG, pelo apoio e colaboração;

à diretoria e funcionários da OGRAMAC Metalização, pelo auxílio na parte experimental;

à Metco, pela doação de parte dos consumíveis utilizados;

à UFMG, pela liberação para realização deste programa;

à Fapesp e à Capes, pelo apoio financeiro;

aos amigos, Prof^ºs. Paulo J. Modenesi, Américo Scotti e Alexandre Q. Bracarense pelas sugestões e apoio,

aos colegas Carlos R. C. Lima, Fábio Martins, Hipólito C. Fals e Valtair A. Ferraresi, pelo companheirismo e amizade;

à minha família, pelo sacrifício e apoio.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos e profunda gratidão.

Assim como o detonar de um relâmpago, embora rápido, devassa as trevas da noite tempestuosa, uma cintilação em sua mente, embora rápida, pode solucionar problemas tidos por insolúveis, oferecer resposta rápida a alguma prolongada dúvida, pode implodir velhas muralhas, remover pedregulhos e amaciar agudos espinhos. O cintilar da compreensão ilumina a meta, mostra o caminho e incentiva o avançar.

(Hermógenes)

Resumo

Quantias elevadas são gastas anualmente na manutenção de turbinas hidráulicas usadas na geração de energia elétrica por causa do ataque cavitacional. Avaliou-se a aplicabilidade de revestimentos metálicos e cerâmicos depositados sobre aço carbono por aspersão térmica a chama na manutenção destes equipamentos em função de sua resistência à erosão por cavitação. Foram realizados ensaios de dureza, rugosidade, ensaio acelerado de cavitação induzida por vibração ultra-sônica, adesão (tração), metalografia por microscopia ótica e eletrônica de varredura, análise química por microsondagem e difratometria de raios-X. Os resultados mostraram que a estrutura lamelar típica dos revestimentos aspergidos por chama favorece o dano cavitacional e que somente revestimentos fundidos após a deposição têm algum potencial para a aplicação pretendida. Esta fusão feita com um arco TIG pode melhorar o desempenho de tais revestimentos e viabilizar sua aplicação em equipamentos de grande porte. Os mecanismos de perda de massa foram evidenciados pela observação por microscopia eletrônica de varredura da superfície cavitada e do resíduo arrancado do material durante o teste de cavitação.

PALAVRAS CHAVE: Cavitação, Aspersão Térmica, Turbinas Hidráulicas.

CAVITATIONAL DAMAGE IN FLAME-SPRAYED COATINGS

Abstract

Much money is annually dispended in the maintenance of hydraulic turbines used in electric power generation due to the cavitational damage. The suitability of flame thermal sprayed coatings on the maintenance of these equipments was evaluated in terms of its cavitational damage resistance. Hardness, roughness, accelerated ultrasonically induced cavitation and adherence tests were performed, as well as optical and scanning electron microscopy, microprobe chemical analysis, and X-ray diffractometry. The results showed that the flame sprayed coating lamellar structure seems to favor the cavitational damage and only fused coatings after spraying have some potential to be applied in turbine's maintenance. This fusion made with a gas tungsten arc may improve the coating performance and allows its application on heavy equipments. The mechanism of mass loss were evidenced by scanning microscopy observations of the cavitated surfaces and of the material detached from the coating during cavitational tests.

KEY WORDS: Cavitation, Flame Sprayed Coatings, Hydraulic Turbines

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvi
 1 - Introdução e Objetivos	 1
 2 - Revisão da Literatura	 6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Turbinas Hidráulicas	7
2.3 - A Cavitação e Seus Efeitos	7
2.3.1 - <i>Definições e Conceitos Fundamentais</i>	7
2.3.2 - <i>Aparência Geral da Zona de Cavitação</i>	11
2.3.3 - <i>Estágios e Tipos de Cavitação</i>	11
2.3.4 - <i>Efeitos e Importância da Cavitação</i>	13
2.3.5 - <i>O Dano Causado Pela Cavitação</i>	15
2.3.6 - <i>Relação Entre as Propriedades dos Materiais e a Resistência à Cavitação</i>	19
2.3.7 - <i>Outras Variáveis que Influenciam o Dano Devido à Cavitação</i>	20
2.3.8 - <i>O Ensaio Acelerado de Cavitação</i>	21
2.4 - Cavitação em Turbinas Hidráulicas	25
2.4.1 - <i>Introdução</i>	25
2.4.2 - <i>Cavitação em Turbinas Hidráulicas</i>	26
2.5 - A Aspersão Térmica	28
2.5.1 - <i>Generalidades</i>	28
2.5.2 - <i>A aspersão Térmica por Combustão</i>	29

2.5.3 - <i>A Aspersão Térmica Elétrica</i>	33
2.5.4 - <i>Pós Para Aspersão Térmica</i>	37
2.6 - Cavitação em Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica	39
2.7 - Rugosidade Superficial	40
2.8 - Planejamento e Análise Experimental	42
2.8.1 - <i>Introdução</i>	42
2.8.2 - <i>Planejamento Experimental</i>	43
2.8.3 - <i>Análise Experimental</i>	45
2.9 - Conclusão	47
 3 - Procedimento Experimental	 50
3.1 - Introdução	50
3.2 - Materiais Utilizados	50
3.3 - Equipamentos utilizados	53
3.4 - Desenvolvimento e Resultados dos Experimentos	53
3.4.1 - <i>Introdução</i>	53
3.4.2 - <i>Seleção Inicial das Ligas</i>	54
3.4.3 - <i>Variação nos Parâmetros de Aspersão</i>	63
3.4.4 - <i>Teste de Revestimento Aspergido de Aço Carbono</i>	65
3.4.5 - <i>Estrutura dos Revestimentos e Mecanismos de Perda de Massa</i>	66
3.4.6 - <i>Teste com um Disco de Revestimento</i>	68
3.4.7 - <i>Influência da Técnica de Preparação dos Resíduos</i>	69
3.4.8 - <i>Influência das Características Superficiais na Resistência à Cavitação</i>	72
3.4.9 - <i>Utilização do Revestimento Fundido</i>	73
3.4.10 - <i>Caracterização Microestrutural</i>	74
 4 - Discussão dos Resultados e Comparação com a Literatura	 79
4.1 - Introdução	79
4.2 - Materiais e Equipamentos Utilizados	79
4.3 - Seleção das Ligas	81
4.3.1 - <i>Aspectos Operacionais</i>	81
4.3.2 - <i>Características dos Revestimentos</i>	82

4.3.3 - <i>Influência da Rugosidade Superficial na Rugosidade do Revestimento</i>	85
4.3.4 - <i>O Ensaio Acelerado de Cavitação Induzida por Vibração Ultra-Sônica</i>	89
4.3.5 - <i>Resistência à Cavitação das Ligas Testadas</i>	92
4.4 - Variação nos Parâmetros de Aspersão	93
4.5 - Revestimento com Aço Carbono	96
4.6 - Mecanismos de Perda de Massa	96
4.7 - Teste com o Disco de Revestimento	98
4.8 - Influência da Técnica de Preparação do Resíduo	98
4.9 - Influência das Características Superficiais na Resistência à Cavitação	99
4.10 - Fusão com TIG e Caracterização Estrutural da Liga Ni-Cr-B	101
4.11 - Conclusão	106
 5 - Conclusões e Avanços Alcançados no Assunto	 108
 6 - Sugestões Para Trabalhos Futuros	 111
 7 - Referências Bibliográficas	 112
 8 - Bibliografia Consultada	 122
 Anexo 1 - Características e Propriedades dos Materiais Usados na Aspersão	 132
 Anexo 2 - Condições Operacionais de Revestimento	 137
 Anexo 3 - Resultados Individuais dos Ensaios Realizados	 143
 Anexo 4 - O Ensaio Acelerado de Cavitação Induzida por Ultrasom	 160

Lista de Figuras

Fig. 2.2.1 - Tipos de rodas de turbinas hidráulicas: Pelton, Francis e Kaplan	8
Fig. 2.3.1 - Cavitação em um sólido de revolução. Tempo de exposição: 1/25 s	11
Fig. 2.3.2 - Cavitação em um sólido de revolução. Tempo de exposição: 10^{-6} s	11
Fig. 2.3.3 - Cavitação incipiente em um sólido de revolução	12
Fig. 2.3.4 - Cavitação num estágio desenvolvido no nariz hemisférico de um sólido de revolução	12
Fig. 2.3.5 - Dano causado pela cavitação às pás do rotor de uma turbina Francis	16
Fig. 2.3.6 - Curva típica de perda de massa com o tempo	22
Fig. 2.3.7 - Superfície de um CP de aço carbono submetido ao ensaio acelerado de cavitação vibratória	24
Fig. 2.4.1 - Vista inferior de uma turbina Francis	26
Fig. 2.4.2 - Detalhe da figura anterior, mostrando áreas protegidas	27
Fig. 2.4.3 - Superfície de outra pá, da mesma turbina, que sofreu ataque cavitacional	27
Fig. 2.5.1 - Seção transversal de um revestimento típico depositado por aspersão térmica. (Esquemático)	29
Fig. 2.5.2 - Principais processos de aspersão térmica	30
Fig. 2.5.3 - Equipamento básico para aspersão por chama (Esquemático)	31
Fig. 2.5.4 - Tocha de detonação (Esquemática)	32
Fig. 2.5.5 - Tocha para aspersão a arco elétrico (Esquemática)	33
Fig. 2.5.6 - Sistema para aspersão térmica a plasma (Esquemático)	34
Fig. 2.5.7 - Partículas de óxido de alumínio para jateamento com e sem uso	36
Fig. 2.5.8 - Pós para aspersão térmica atomizados a gás e a água. MEV	37
Fig. 2.5.9 - Aparência de um pó para aspersão térmica moído e peneirado. MEV	38
Fig. 2.7.1 - Definições de parâmetros associados à medida de rugosidade	42
Fig. 3.2.1 - Corpo de prova para ensaio de cavitação	51
Fig. 3.2.2 - Corpo de prova para ensaio de adesão	52
Fig. 3.4.1 - Gabarito para aspersão dos corpos de prova	56

Fig. 4.9.1 - Resultado de ensaio de cavitação do aço ABNT 1020	100
Fig. 4.10.1 - Seção transversal do revestimento fundido com TIG	103
Fig. 4.10.2 - Superfície cavitada do revestimento fundido a arco e a chama	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.3.I - Valores numéricos estimados para algumas características do ataque cavitacional	18
Tabela 2.5.I - Temperatura de chama de alguns gases combustíveis	30
Tabela 2.5.II - Comparação de características de processos de aspersão térmica	35
Tabela 2.7.I - Comprimento de amostragem para a determinação de Ra em perfis aperiódicos	41
Tabela 2.8.I - Valores de DR_0	46
Tabela 3.2.I - Composição química do aço ABNT 1020	50
Tabela 3.2.II - Materiais utilizados para revestimento	52
Tabela 3.4.I - Corpos de prova usados na seleção das ligas	55
Tabela 3.4.II - Espessuras médias das camadas depositadas	56
Tabela 3.4.III - Resultados dos ensaios de dureza Rockwell, microdureza Vickers e rugosidade	58
Tabela 3.4.IV - Resultados dos ensaios de dureza e rugosidade	63
Tabela 3.4.V - Resultados do ensaio de adesão (tração)	64
Tabela 3.4.VI- Rugosidade dos CP's de aço carbono	73
Tabela 3.4.VII- Espessura, dureza e aderência dos revestimentos fundidos	75
Tabela 3.4.VIII - Composição química média determinada (% peso)	75
Tabela 34.IX - Fases microestruturais identificadas na liga NiCrFeBSiC.....	76
Tabela 4.3.I - Comparação de medidas de rugosidade em diferentes condições	87
Tabela 4.3.II - Dureza Rockwell C	88
Tabela 4.4.I - Valores de R para as ligas bronze-alumínio e aço inoxidável AISI 420	94
Tabela 4.9.I - Valores de R e T_0 para o aço carbono	100
Tabela 4.10.I - Valores de R e T_0 para revestimentos fundidos	102

Nomenclatura

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing Materials

AWS - American Welding Society

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CP('s) - Corpo(s) de Prova

C.V. - Coeficiente de Variação

D.P. - Desvio Padrão

EDS - Energy Dispersive Spectroscopy

ISO - International Standard Organization

M - Massa

M_0 - Constante

MEV - Microscópio (Microscopia) Eletrônica de Varredura

r - Constante de proporcionalidade, taxa de perda de massa

R - Constante indicativa de resistência ao dano cavitacional, inverso de r

R_a - Rugosidade média

t - tempo

T_0 - Tempo de incubação

TIG - Processo de soldagem com eletrodo de tungstênio e proteção com gás inerte

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

“Quem não desemborca seu pote, que razão tem para reclamar e pedir mais chuva?”

A cavitação é um fenômeno que consiste na formação, evolução e colapso de bolhas de gás, ou principalmente vapor, e pode ocorrer em fases líquidas sujeitas a gradientes de pressão, tanto em condições estáticas quanto dinâmicas. Como resultado da cavitação podem ocorrer diversos fenômenos, tais como: diminuição da eficiência de equipamentos, vibração e ruído e, como efeito mais espetacular, embora totalmente indesejável, a erosão de superfícies sólidas em contato com o líquido (KNAPP, 1970). Esta perda de material é referida na literatura como dano ou erosão cavitacional ou, muitas vezes, como cavitação simplesmente.

A cada ano são gastos muitos recursos na manutenção e recuperação dos sistemas de geração das usinas hidrelétricas do país, desgastados e avariados pela cavitação. Em geral, na manutenção dos equipamentos, são normalmente usados processos convencionais de soldagem para a deposição de ligas também convencionais, particularmente aços inoxidáveis. Na maioria das usinas, os procedimentos e técnicas de recuperação e manutenção não são padronizados, os procedimentos e consumíveis utilizados não são devidamente qualificados e registrados, de forma que em cada caso é adotado um procedimento único, com resultados nem sempre adequados ou, se for o caso, passível de ser reproduzido. Isto resulta em custos elevados de manutenção e resultados nem sempre satisfatórios ou repetitivos (ARAÚJO, 1995).

PROCOPIAK (1994) fala em gastos estimados da ordem de 100 mil dólares anuais com reparos de turbinas devido à cavitação na Companhia Paranaense de Energia - COPEL, incluindo consumíveis e mão de obra. PEREIRA (1995) cita custos da ordem de 80 e 100 mil dólares para recuperação de turbinas hidráulicas da Companhia Paranaense de Energia - COPEL e das Centrais Elétricas do Sul do Brasil - ELETROSUL, incluindo mão de obra,

materiais, alojamento, alimentação e transporte, em 1989 e 1992, respectivamente. ARAÚJO (1995) fala em custos da ordem de 8 mil dólares anuais, por máquina, na recuperação do desgaste por cavitação do sistema de sucção das turbinas hidráulicas da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Se, além dos custos diretos, forem somadas as perdas advindas da não disponibilidade do equipamento (lucro cessante), os valores gastos em função dos efeitos da cavitação podem ser ainda muito mais elevados. PROKOPIAK (1994) cita cifras da ordem de 500 mil dólares anuais.

Assim, o desenvolvimento e a disseminação de técnicas e processos que reduzam o tempo de parada e/ou aumentem o tempo entre paradas para manutenção dos equipamentos de geração de energia hidrelétrica podem resultar em grande economia para este setor, mesmo que se utilizem equipamentos e materiais de custo superior, num primeiro momento.

A deposição de revestimentos por soldagem tem sido pesquisada no Brasil nos últimos anos como alternativa para obtenção de melhor desempenho de turbinas hidráulicas quanto à cavitação (HÜHNE, 1991; PROKOPIAK, 1994; SÓ, 1995; ARAÚJO, 1996). Materiais e processos alternativos têm sido tentados em outros países com o mesmo propósito (ASAHI, 1976; AKHTAR, 1982; GUO, 1986; KARIMI, 1989; JOHNSON, 1990; TOMLINSON, 1991; AKSENOV, 1992; RICHMAN, 1992; JUN, 1993; TAKEDA, 1993)

Diversas outras técnicas e processos para deposição de filmes e revestimentos estão disponíveis atualmente, permitindo a aplicação de materiais metálicos, cerâmicos, refratários, entre outros, e têm sido utilizadas em diferentes tipos de indústria, inclusive para proteção contra corrosão e desgaste, entre elas a aspersão térmica (BISWAS, 1986).

A aspersão térmica consiste num conjunto de processos e técnicas que permitem a deposição de revestimentos metálicos, cerâmicos ou misturas destes, em geral camadas de alto desempenho, com grande flexibilidade e relativas simplicidade, rapidez e baixo custo. Este tipo de operação já era conhecido desde o início do século, mas só passou a ter importância industrial significativa a partir da década de 60, quando foi definitivamente adotado pela indústria aeroespacial (AWS, 1985). Nos últimos anos, com a retração do mercado mundial de

motores para aviação, esta atividade tem passado por um período de transição, no qual a gama de aplicações tem se expandido, devido ao aumento da competição entre novos processos, novos fornecedores, novas tecnologias, ao desenvolvimento de novos equipamentos e novos consumíveis de alto desempenho e à diminuição de custos. A aspersão térmica tem sido utilizada tanto em manutenção e reparo quanto na fabricação e diversos exemplos de aplicações podem ser encontrados na literatura (KEMPTON, 1991; THORPE, 1992, 1993).

A deposição de revestimentos por aspersão térmica apresenta como vantagens principais, em relação à deposição por processos de soldagem, temperaturas máximas relativamente baixas atingidas pelo substrato (material base), a não ocorrência de diluição (na maioria dos processos) e principalmente, no caso de turbinas hidráulicas, a manutenção do perfil original da peça revestida, como resultado das baixas espessuras normalmente depositadas, inferiores a um milímetro.

Como se verá no capítulo seguinte, foram encontrados poucos estudos sobre a utilização de revestimentos depositados por aspersão térmica como tentativa de minimização do dano causado pela cavitação em equipamentos hidráulicos. Embora os resultados de tais estudos indicassem algum potencial, esta possibilidade não foi intensivamente explorada.

Devido a esta escassez de informação específica, neste trabalho teve-se como objetivo principal realizar um estudo da aplicabilidade de revestimentos depositados por aspersão térmica a chama às turbinas hidráulicas utilizadas na geração de energia elétrica, em condições industriais. Para isto, a resistência ao dano cavitacional de revestimentos de diferentes tipos e ligas foi avaliada através de ensaio específico, baseado na norma ASTM G-32/85. Também foi feita uma caracterização dos revestimentos quanto a aspectos estruturais, através de técnicas de metalografia ótica e eletrônica de varredura e difração de raios-X. Estas características foram correlacionadas ao desempenho dos diversos tipos de revestimento e aos mecanismos de ataque.

Sobretudo, tentou-se definir materiais e técnicas de revestimento por aspersão térmica a chama que resultassem em boa resistência ao dano cavitacional e que apresentassem vantagens em relação às técnicas convencionais de manutenção utilizadas atualmente no parque hidrelétrico do país. Entretanto, o universo explorado foi reduzido, apesar das

possibilidades serem extremamente amplas, considerando-se que a principal aplicação deste estudo será na manutenção de equipamentos já instalados e que as condições de acesso e execução dos reparos são bastante limitadas

Assim, como o uso de equipamentos de grande porte e/ou peso, bem como tratamentos térmicos a temperaturas elevadas ou usinagem sofisticada ou de precisão é virtualmente impossível, técnicas que não poderiam ser usadas em campo, isto é, em usinas hidrelétricas em operação, não foram tentadas.

Informações sobre o ensaio acelerado de cavitação induzida por vibração ultra-sônica puderam ser evidenciadas, em função do número de testes realizados. O efeito de algumas características superficiais no resultado deste ensaio foi também explorado.

Na medida do possível, técnicas de planejamento e análise experimental foram consideradas no desenvolvimento deste trabalho. O estudo experimental de fenômenos complexos, particularmente os que envolvem um grande número de variáveis, pode exigir um número excessivamente alto de experimentos, o que, na maioria das vezes, o inviabiliza. Uma das maneiras de se resolver estes problemas é o uso de técnicas estatísticas de planejamento e análise experimental, que permitem diminuir sensivelmente o número de ensaios, sem perda de informação. Particularmente, técnicas estatísticas de análise experimental e testes de hipóteses foram utilizados na análise de resultados.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre a cavitação e seus efeitos, aspersão térmica e planejamento e análise experimental. Também são apresentados conceitos básicos de outros assuntos relacionados a estes temas principais e ao trabalho desenvolvido, visando facilitar o entendimento do mesmo, como tipos de turbinas hidráulicas, rugosidade superficial e sua medida.

No capítulo 3 são apresentados o procedimento experimental e os resultados obtidos nas diversas etapas do trabalho. Também são apresentadas breves discussões destes resultados, que serviram para orientar e justificar a definição das etapas seguintes.

No capítulo 4 são discutidos detalhadamente os resultados obtidos e são feitas comparações com os resultados encontrados na literatura. O desempenho dos revestimentos depositados por aspersão térmica a chama frente ao dano causado pela cavitação é avaliado à luz destas informações. Modelos de ataque cavitacional são propostos e discutidos. São ainda identificadas as variáveis mais importantes do processo de aspersão térmica e do ensaio de cavitação e sua influência na resistência dos revestimentos ao dano cavitacional. Finalmente são elaboradas recomendações para deposição de revestimentos por aspersão térmica à chama com resistência ao dano cavitacional maximizada, considerando-se condições industriais e dentro das limitações impostas.

No capítulo 5 são apresentadas, de forma simplificada, as conclusões deste trabalho, ressaltando-se os resultados mais importantes e o acréscimo dado ao conhecimento dos temas estudados.

No capítulo 6 são dadas sugestões para estudos futuros, que poderiam fornecer novas informações e aprofundar o conhecimento até aqui obtido sobre os temas tratados e esclarecer novas dúvidas e questionamentos que se apresentaram.

No capítulo 7 apresentam-se as referências bibliográficas citadas no texto e no capítulo 8 toda a bibliografia consultada no decorrer deste estudo, que de alguma forma está relacionada aos temas tratados, e pode ser de interesse para trabalhos posteriores.

Os resultados de ensaios individuais, de modo geral, não foram incluídos no texto, para que este não se tornasse monótono e truncado. Estes resultados e outras informações julgadas de interesse são apresentados nos Anexos.

REVISÃO DA LITERATURA

“É aconselhável entender a natureza, para cumprir suas leis, sem repressão, sem lamúrias, sem medo, mas com lucidez e serenidade.”

2.1 - Introdução

Neste capítulo é feita uma revisão de conceitos básicos em diversas áreas, objetivando facilitar o entendimento do assunto estudado. Apresentam-se os principais conceitos, resultados e conclusões encontrados na literatura sobre a cavitação, o dano por ela causado e sua prevenção. Também são apresentados os principais processos de aspersão térmica e técnicas de planejamento e análise experimental. Uma seção específica apresenta estudos envolvendo danos causados pela cavitação em revestimentos por aspersão térmica. Outras observações e conclusões encontradas na literatura serão citadas ainda na discussão dos resultados deste trabalho.

Na preparação deste capítulo, utilizou-se basicamente as referências levantadas sob os títulos principais de Cavitação (Cavitation) e Aspersão Térmica (Thermal Spraying) da base de dados Engineering Index (GENINDEX), na versão em CD-ROM, entre os anos de 1989 e 1995. Esta pesquisa foi realizada na Biblioteca da Área de Engenharia-BAE da Unicamp. As bases de dados METADEX e WELDSEARCH foram acessadas via CNEN, através da Biblioteca Central da UFMG, tendo sido pesquisado o período entre 1989 e 1993. Poucos trabalhos de autores nacionais sobre cavitação e aspersão térmica foram encontrados .

2.2 - Turbinas Hidráulicas

Turbinas são máquinas que transformam a energia disponível devido ao movimento de fluidos em energia mecânica, na forma de movimento de rotação. No Brasil, em função de sua extensa bacia hidrográfica, as turbinas usadas na geração de energia elétrica são principalmente máquinas hidráulicas. As turbinas hidráulicas possuem basicamente duas partes, uma fixa (caixa, tubos e comportas distribuidoras e controladoras de fluxo) e outra móvel (eixo, roda e palhetas).

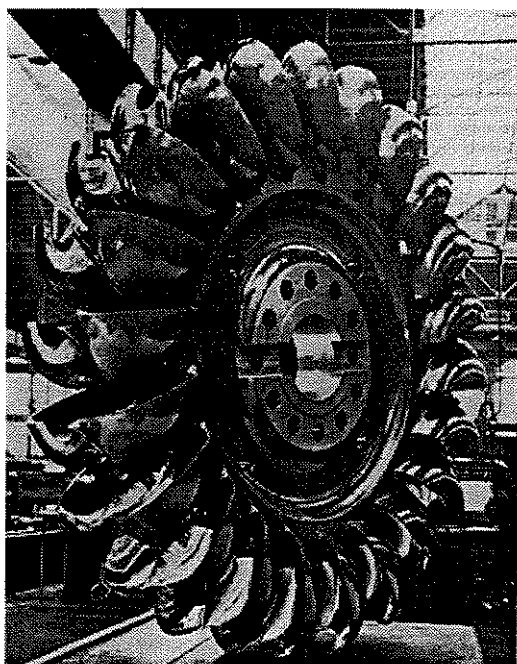
As turbinas hidráulicas podem ser classificadas basicamente em dois tipos: as de ação, impulsão ou choque e as de reação ou pressão. As turbinas do primeiro tipo podem ter seu eixo na vertical ou horizontal e as mais utilizadas são as do tipo Pelton, que são uma versão moderna das chamadas "rodas d'água". Consistem de uma roda dotada de palhetas côncavas, impulsionadas por jatos de água provenientes de um a seis bocais, direcionados contra as palhetas, cuja parte inferior se encontra acima do nível superior da água na saída do equipamento. São utilizadas, em geral, para quedas de grande altura e pequeno volume de água.

As turbinas de reação têm seu eixo sempre na vertical e trabalham submersas. Suas palhetas têm uma forma curva, em espiral, como a hélice propulsora de navios, que são acionadas em consequência do peso e velocidade de deslocamento da água. Podem ser do tipo Francis, com palhetas fixas, ou do tipo Kaplan, cujas palhetas são móveis, podendo-se variar sua inclinação em relação ao eixo da máquina. De uma forma geral e simplificada, pode-se dizer que as turbinas de reação normalmente são usadas em quedas com pequena altura e grandes volumes de água. A figura 2.2.1 mostra os tipos de turbinas hidráulicas citados.

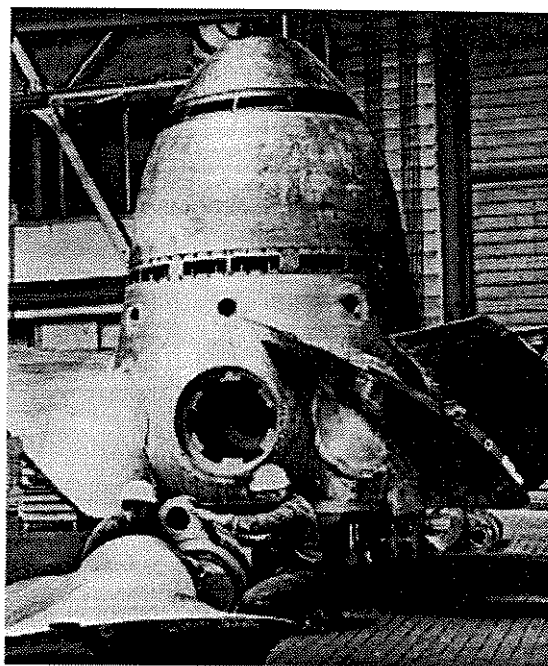
2.3 - A Cavitação e Seus Efeitos

2.3.1. - Definições e Conceitos Fundamentais

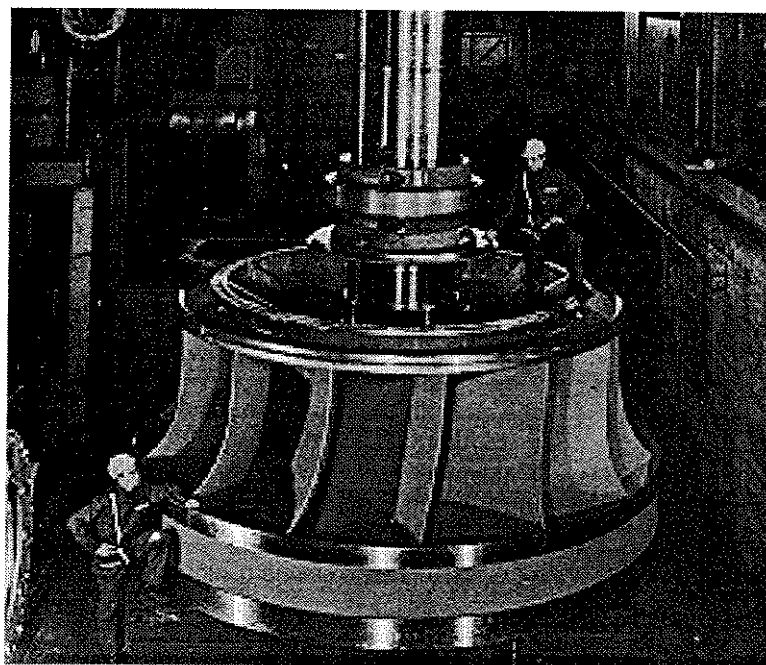
Quando uma certa quantidade de líquido é aquecida sob pressão constante ou sua pressão é reduzida por meios estáticos ou dinâmicos à temperatura constante, um estado é alcançado,



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.2.1 - Tipos de rodas de turbinas hidráulicas: (a) Pelton, (b) Kaplan e (c) Francis.
(adaptado de MACINTYRE, 1983)

no qual bolhas cheias de vapor, ou vapor e gases, ou **cavidades** se tornam visíveis e crescem. Este crescimento pode ser a uma taxa fixa, se ele se dá por difusão de gases dissolvidos para a cavidade ou meramente por expansão destes gases devido ao aumento da temperatura ou

diminuição da pressão. O crescimento também poderá ser "explosivo" se ele resulta principalmente de vaporização na cavidade. Esta condição é conhecida como **fervura** ou **ebulição**, se causada por aumento de temperatura, ou como **cavitação**, se causada por diminuição da pressão, a uma temperatura essencialmente constante. O crescimento das bolhas por difusão é chamado de **desgaseificação**, embora possa também ser chamado de **cavitação gasosa** quando induzida por redução dinâmica da pressão em contraste com **cavitação vaporosa**, se induzida por aumento de temperatura (KNAPP, 1970).

A rigor, o termo "cavitação" é usado para eventos concomitantes com a variação dinâmica da pressão, como a que ocorre em campos de pressão hidrodinâmicos, sobretudo para eventos relacionados tanto ao aumento como à diminuição da pressão, naqueles casos em que uma bolha sujeita a um aumento de pressão cessa seu crescimento e o processo é revertido. Nesta situação, a bolha sofre um colapso e, geralmente, desaparece, como consequência da solução dos gases e condensação do vapor. O colapso ocorre "implosivamente" para uma cavidade cheia de vapor e com conteúdo de gás desprezível. O processo de colapso é mais lento se o conteúdo de gás for alto.

Em resumo, a cavitação envolve uma sequência de eventos, começando com a formação da cavidade e se estendendo até seu colapso. Contrariamente, no processo de fervura, as bolhas de vapor crescem continuamente e, ao invés de entrarem em colapso, seu crescimento e coalescimento faz com que as massas de vapor se condensem lentamente.

Segundo KNAPP (IBDEM), uma análise desta descrição mostra que:

- a) a cavitação é um fenômeno no líquido e não ocorre, em nenhuma circunstância normal, em gases e sólidos;
 - b) a cavitação é o resultado da redução de pressão em um líquido e, presumivelmente, pode ser controlado pela intensidade desta redução ou, estritamente falando, existe uma pressão mínima para a ocorrência do fenômeno. Se a pressão é reduzida e mantida por um tempo suficiente abaixo deste valor crítico, determinado pelas condições e propriedades do líquido, ocorrerá cavitação, caso contrário, nenhuma cavitação ocorrerá;
 - c) a cavitação está relacionada ao aparecimento e desaparecimento de cavidades num líquido.
- Note-se que o termo "cavidade" está associado à idéia de oco, vazio. Em muitos aspectos esta

escolha é feliz, pois enfatiza o conceito de vazio. É simples inferir que, se as cavidades são essencialmente vazias, seu conteúdo não tem nenhum efeito no fenômeno físico. Todos os efeitos observados da cavitação podem ser relacionados ao comportamento do líquido. Como já dito e será descrito posteriormente, este conceito de cavidade oca não é estritamente verdadeiro, embora durante a maior parte de sua existência, seu conteúdo tenha muito pouca importância. As únicas exceções importantes são as extremidades de início e fim do ciclo da cavidade, quando suas dimensões são microscópicas ou sub-microscópicas;

d) a cavitação é um fenômeno dinâmico e está relacionado ao crescimento e colapso de cavidades.

Ainda de acordo com KNAPP (IBDEM), algumas informações também pertinentes podem ser obtidas examinando-se o que a descrição inicial do fenômeno não contém. Algumas omissões importantes são:

- a) não há indicação se o líquido está em repouso ou em movimento, devendo estar implícito que a cavitação possa ocorrer em ambos os casos;
- b) não há indicação de que a ocorrência de cavitação está restrita ou excluída de contornos sólidos. Portanto, parece que a cavitação pode ocorrer tanto no interior do líquido quanto num contorno sólido;
- c) a descrição se refere à dinâmica do comportamento da cavidade. Uma distinção está implícita entre o comportamento do fenômeno hidrodinâmico da cavitação e seus efeitos, como a erosão por cavitação.

A descrição feita de um ciclo vaporização/colapso é a característica básica da cavitação e, em muitos casos, o fenômeno manifesta-se completamente pelo simples ciclo dinâmico de pequenas bolhas. Em estágios avançados, além do limiar, a cavitação hidrodinamicamente produzida pode se tornar mais complexa, como será descrito posteriormente. Contudo, todas as conclusões gerais tiradas previamente permanecem aplicáveis.

Ainda, a descrição dada anteriormente relaciona fervura, cavitação vaporosa e cavitação gasosa como fenômenos parecidos, senão idênticos, em todos os aspectos. Outro fenômeno similar é a grande cavidade quasi-estacionária mantida por **ventilação**. Esta importante situação é obtida, sob certas circunstâncias, se um fluxo contínuo de gás é naturalmente aspirado ou

alimentado numa região de baixa pressão, hidrodinamicamente criada atrás de um corpo sólido. Grandes cavidades ventiladas têm as mesmas características gerais de certas cavidades em estágios avançados resultantes da vaporização, exceto na extremidade da cavidade, de onde o gás é removido por dissolução, sem condensação.

2.3.2. - Aparência Geral da Zona de Cavitação

Embora tenha sido notado que as manifestações da cavitação sejam de muitos tipos diferentes, à vista elas têm sempre a mesma aparência, isto é, parecem-se com uma névoa de espuma de sabão. A razão para isso é que, sendo a cavitação um fenômeno de alta velocidade, os movimentos são muito rápidos para serem resolvidos pelo olho humano ou por uma câmara comum, dando a impressão de a imagem estar ligeiramente fora de foco. As figuras 2.3.1 e 2.3.2 mostram o mesmo fenômeno.

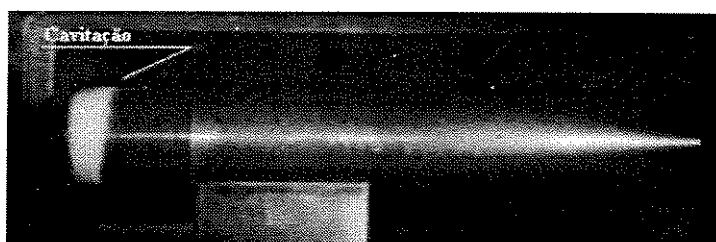


Fig. 2.3.1 - Cavitação em um sólido de revolução. Tempo de exposição: 1/25 s.
(KNAPP, 1970)

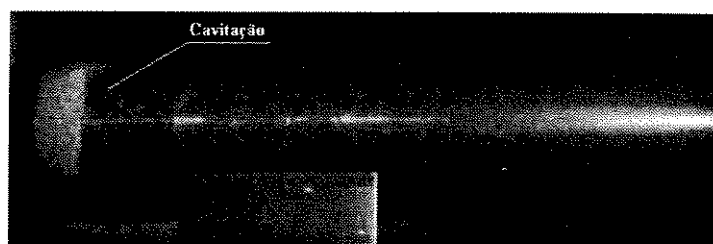


Fig. 2.3.2 - Cavitação em um sólido de revolução. Tempo de exposição: 10^{-6} s.
(KNAPP, 1970)

2.3.3 - Estágios e Tipos de Cavitação

O termo *estágio incipiente* tem sido usado há muito tempo para descrever a cavitação no limite de detecção. As bolhas observáveis neste estágio são pequenas e a zona na qual a

cavitação ocorre é limitada. A figura 2.3.3 mostra uma linha de bolhas de cavitação no estágio incipiente na superfície do nariz de um sólido de revolução.

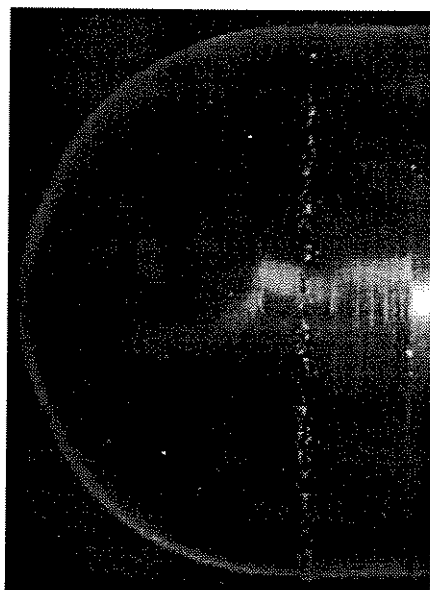


Fig. 2.3.3 - Cavitação incipiente no nariz hemisférico de um sólido de revolução. Cavidades intermitentes próximas mas não presas ao sólido. (KNAPP, 1970)

Se ocorrerem variações nas condições do líquido (pressão, velocidade, temperatura) que aumentem as taxas de vaporização, outros estágios vão se sucedendo, distintos do estágio incipiente, chamados *desenvolvidos*. A figura 2.3.4 mostra a cavitação no mesmo sólido da figura anterior, num estágio desenvolvido.

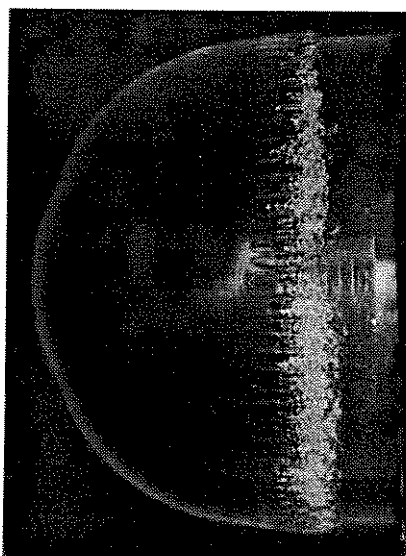


Fig. 2.3.4 - Cavitação num estágio desenvolvido no nariz hemisférico de um sólido de revolução. Anéis de cavidades intermitentes como que presos ao sólido. (KNAPP, 1970).

As condições que marcam o limite ou *limiar* entre nenhuma cavitação e cavitação detectável não são idênticas se observadas quando a cavitação aparece e quando desaparece. O termo *incipiente* tem sido reservado para a cavitação existente nas condições de limiar de cavitação.

Os eventos exatos no início e desenvolvimento da cavitação dependem das condições do líquido, incluindo a presença de contaminantes sólidos ou gasosos, e do campo de pressão na zona de cavitação. Também as manifestações da cavitação hidrodinamicamente produzidas dependem destes fatores, bem como da configuração dos contornos sólido/líquido.

Segundo KNAPP (IBDEM), há diversas maneiras de se classificar as diferentes aparências da cavitação. Uma, por exemplo, é de acordo com as condições nas quais a cavitação ocorre, isto é, cavitação num jato de fluxo, cavitação em corpos imersos em movimento e cavitação sem um fluxo principal. Outro método possível é segundo as características físicas principais. Mesclando-se os dois métodos, a cavitação pode ainda ser classificada como: móvel, fixa, em turbilhão ou vibratória. Outra característica importante em várias circunstâncias, que pode ser aplicável às categorias anteriores, é a cavitação ser transiente ou quasi-estacionária.

Os nomes acima foram escolhidos numa tradução livre dos termos usados na língua inglesa, que também variam de um autor para outro, já que não existe uma lista de termos padronizada na literatura sobre o tema. Uma razão para isso é o amplo espectro de experiências e condições de observação dos fenômenos de cavitação.

2.3.4 - *Efeitos e Importância da Cavitação*

A cavitação tem uma importância relativamente grande, devido aos seus efeitos. Estes podem ser classificados em três categorias principais: (a) efeitos que modificam a hidrodinâmica de um fluxo de líquido; (b) efeitos que produzem dano nas superfícies sólidas em contato com o fluxo e (c) efeitos estranhos que podem ou não ser acompanhados de modificações significativas da hidrodinâmica de fluxo ou danos a superfícies sólidas.

MATHIAS (1991) estudou as tensões, texturas e mudanças superficiais induzidas pela cavitação em aços e concluiu que estas são similares às produzidas por martelamento, exceto no que tange à degradação do limite de escoamento, devida à aplicação de cargas alternadas em alta frequência.

Infelizmente para a hidrodinâmica aplicada, os efeitos da cavitação, com pouquíssimas exceções, são indesejáveis. Cavitação descontrolada pode produzir danos sérios e mesmo catastróficos. A necessidade de prevenção ou controle da cavitação impõe sérias limitações ao projeto de muitos equipamentos hidráulicos. A simples enumeração de alguns tipos de estruturas, equipamentos ou sistemas de fluxo cujo desempenho pode ser seriamente afetado pela presença da cavitação servirá para enfatizar sua vasta ocorrência e sua importância relativa.

No campo da maquinaria hidráulica tem sido notado que todos os tipos de turbina desde a Francis, de baixa velocidade específica, à Kaplan, de alta velocidade específica, são susceptíveis à cavitação. Bombas centrífugas ou de fluxo axial também sofrem seus efeitos e mesmo bombas de diafragma podem ser perturbadas por ela. Embora a cavitação possa ser agravada por um projeto deficiente, ela pode ocorrer mesmo em equipamentos bem projetados, mas que operem em condições desfavoráveis.

A cavitação também pode ocorrer em outros dispositivos que não envolvem entrada ou saída de energia mecânica. A operação de válvulas e fixadores de todos os tipos que envolvem uma variação na velocidade do líquido que passa através deles pode ser afetada pela cavitação. Medidores de fluxo do tipo venturi, furos e orifícios formam uma classe de sistemas de fluxo nos quais o desenvolvimento da cavitação pode destruir completamente sua efetividade. Neste tipo de medidores, a velocidade de fluxo é medida a partir da queda de pressão necessária para acelerar o fluxo na passagem de uma seção transversal maior para uma menor. Qualquer coisa que mude as seções efetivas ou a perda de energia entre elas afeta a precisão da medida.

Mais recentemente, o efeito nocivo da cavitação foi observado na fabricação de dispositivos magnéticos de armazenamento de dados (NAGARAJAN, 1992) durante uma limpeza, na qual se utiliza vibração ultra-sônica.

Diante do exposto, é compreensível que muito esforço tem sido despendido na tentativa de se evitar a cavitação e seus efeitos através do projeto. Historicamente, este esforço tem enfatizado a prevenção da cavitação com o ônus do projeto conservativo em termos de tamanho, peso e custo. Entretanto, em muitas áreas, como a aeronáutica e espacial, este conservadorismo crescente é intolerável. Assim, muito esforço tem sido despendido também no sentido de se projetar tentando evitar as consequências da cavitação, mas admitindo-se sua existência (KARIMI, 1986).

Em algumas poucas aplicações a cavitação tem sido desejada, nas quais seus efeitos são benéficos. A cavitação induzida através do som é uma delas, utilizada na limpeza de peças complicadas, como válvulas de precisão, e para a agitação e mistura em processos especiais. Cavitação em orifícios de venturi pode ser usada como mecanismo de controle de fluxo.

Pode ser notado que o líquido mais comum citado nos exemplos anteriores é a água. Isto se deve meramente ao fato da água ser o mais universal dos líquidos e utilizada de maneira extensiva. Contudo, a cavitação tem sido observada em diversos outros líquidos, muitas vezes conjuntamente com a corrosão, o que tem merecido uma consideração especial no projeto e operação de refinarias e tubulações. Dificuldades no controle do fluxo de metal líquido em usinas também têm sido atribuídas ao desenvolvimento da cavitação. No outro extremo, os efeitos da cavitação também têm sido observados no manuseio de hélio líquido e outros gases criogênicos. A cavitação tem sido observada tanto a baixas quanto a altas temperaturas, importantes nos campos aeroespacial e nuclear, por exemplo.

2.3.5 - O Dano Causado Pela Cavitação

O dano causado pela cavitação é o mais espetacular e, pelo menos na área da engenharia, o mais reconhecido efeito da cavitação. Este dano é tão familiar ao pessoal da área e tão reconhecidamente ligado ao fenômeno da cavitação que tem sido referido simplesmente como **cavitação**, confundindo-se causa e efeito.

A remoção de material sólido da superfície em contato com o fluxo tem sido o principal dano causado pela cavitação. Ela tem sido observada em todo tipo de sólido. Assim, metais

duros ou macios, dúcteis ou frágeis, quimicamente ativos ou inertes têm sido danificados pela cavitação. Borracha, plástico, vidro, quartzo, concreto e outros sólidos não metálicos têm sido igualmente susceptíveis ao dano devido à cavitação. A figura 2.3.5 mostra o dano causado pela cavitação a pás de uma turbina Francis, com cerca de 25.000 horas de operação após a última parada para manutenção.

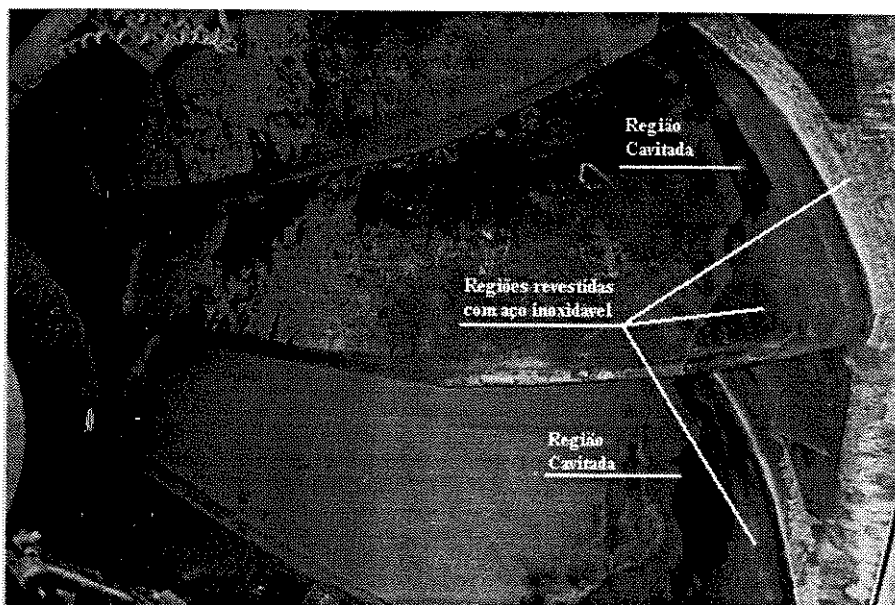


Fig. 2.3.5 - Dano causado pela cavitação às pás do rotor de uma turbina Francis.

Diversos autores (KNAPP, 1970; EISENBERG, 1986; TULLIS, 1989, entre outros) admitem dois mecanismos para explicar a ocorrência de dano a superfícies sólidas. O primeiro se baseia na geração de ondas de choque na implosão das bolhas, cuja pressão tem sido estimada ser da ordem de 10^6 psi (6.895 MPa). O outro utiliza os chamados “microjatos”, que são formados quando a bolha entra em colapso num campo de pressões assimétrico, gerando um jato de líquido de alta velocidade na direção da superfície sólida, capaz de criar pontos de ataque. IWAI (1989, 1991) e OKADA (1989) investigaram as pressões de colapso de bolhas e sua relação com a erosão produzida pela cavitação.

Mais recentemente, CHEN e co-autor (1991) propuseram um novo mecanismo, pelo qual o dano ocorre durante a formação da cavidade no líquido e não no seu colapso, baseados num estudo de deformações elasto-hidrodinâmicas utilizando técnicas de medição de forças superficiais (Surface Force Apparatus - SFA), juntamente com técnicas de interferência ótica

(Fringes of Equal Chromatic Order - FECO), que permitem medições com grandes precisão e resolução. Entretanto, parece que este novo mecanismo é compatível com a cavitação gerada por vibração, mas não com a cavitação gerada em sistemas de fluxo, pois, como observou KNAPP (1970), neste caso, o dano nem sempre ocorre na mesma região onde ocorreu a formação das cavidades

Ainda segundo KNAPP (IBDEM), um exame das áreas no início do ataque em testes com alumínio num sistema de fluxo hidráulico, nos quais se variou apenas o tempo, mostra que:

- a) pontos de ataque grandes, pela sua simetria e nitidez de contorno, constantes com o aumento do tempo de exposição, parecem ter sido formados num único colapso, sem remoção de material, por deformação plástica no ponto de impacto;
- b) os pontos são bastante espaçados, sem outro dano visível;
- c) muitos pontos permanecem inalterados por longos períodos de tempo, apenas ocorrendo o aparecimento de novos pontos parcialmente superpostos, causando deformação plástica adicional.

Sem postular o mecanismo exato de dano, é possível estimar grosseiramente o tamanho inicial da cavidade que produz o ponto de ataque de um determinado tamanho e a distância do centro de colapso à superfície sólida, baseado numa extensa cadeia de suposições, como mostrada por KNAPP (IBDEM). A Tabela 2.3.I mostra alguns valores numéricos obtidos.

Ainda de acordo com este mesmo autor, a tabela citada tem algumas limitações. Primeiro, alguns resultados podem não ser precisos, mesmo que as suposições básicas sejam todas corretas, porque é difícil obter medidas precisas da profundidade dos pontos de ataque. Esta dimensão crítica afeta todos os resultados. Além disso, o modelo difere, em muitos detalhes, da situação real. Por um lado, o colapso a tal proximidade da superfície é, indubitavelmente, assimétrico, complicando o mecanismo de transmissão de energia para a produção do ataque. É também improvável que a fração do trabalho de colapso absorvido na formação do ponto de ataque seja a simples constante assumida, mesmo para ondas de choque radiais. Apesar disso, o cálculo pode dar uma idéia geral das relações entre o tamanho da bolha, energia disponível e posição de colapso, por um lado, e o trabalho de deformação e formação do ponto de ataque, por outro.

Tabela 2.3.I - Valores numéricos estimados para algumas características do ataque cavitacional (adaptado de KNAPP, 1970)

Ponto de ataque				Bolha em colapso		
Diâmetro Medido (pol.x10 ⁻³) [mm]	Profundidade medida (pol.x10 ⁻⁴) [mmx10 ⁻²]	Razão de volumes ⁽¹⁾	Trabalho de formação ⁽²⁾ (pol.lbx10 ⁴) [kJ]	Trabalho de colapso ⁽³⁾ (pol.lbx10 ⁴) [kJ]	Diâmetro inicial da bolha ⁽⁴⁾ (pol.x10 ⁻²) [mm]	Distância centro-superfície ⁽⁵⁾ (pol.x10 ⁻³) [mm]
5 [0,127]	7 [1,78]	0,077	4,2 [4,74]	55 [62,1]	7,3 [1,85]	5 [0,127]
7 [0,178]	6 [1,52]	0,029	5,2 [5,87]	180 [203,2]	10,6 [2,69]	10 [0,254]
2,4 [0,061]	4 [1,02]	0,10	0,54 [0,61]	5,4 [6,1]	3,3 [6,84]	2 [0,051]

- Assumiu-se que o ponto de ataque é um segmento de esfera para o cálculo do volume. A razão de volumes é igual ao (volume da pirâmide esférica cuja base é o ponto de ataque) + (volume da esfera subtendida). Assume-se que esta é a porção da energia total para formação do ponto de ataque.
- O trabalho de formação é assumido ser o mesmo por unidade de volume que o requerido por um penetrador Vickers de pirâmide de diamante para produzir uma impressão similar, que foi medido e vale em torno de 42,18 kgf.mm/mm³ (60.000 lb.pol/pol³) de impressão para o alumínio recozido usado nos testes
- Calculado igualando-se o quociente de trabalho de formação do ponto de ataque e razão de volumes.
- O volume da bolha é calculado assumindo-se uma igualdade entre a porção geometricamente efetiva do trabalho de colapso da bolha e o trabalho de formação do ponto de ataque e então assumindo-se (trabalho de colapso da bolha) = $[p_{\infty} - p_v]/2$ (volume inicial da bolha), que parece ser uma aproximação razoável do diâmetro mínimo da bolha.
- Calculado assumindo-se que o ponto de ataque é uma porção de uma esfera e usando o diâmetro e profundidade medidos do ponto de ataque.

Os tamanhos de cavidades da Tabela 2.3.I que produzem danos são consideravelmente maiores que os tamanhos médios daquelas vistas na interface entre a cavidade fixa e o fluxo principal num sistema de fluxo hidráulico, como observado por KNAPP (IBDEM). O mesmo autor menciona que isto sugere algumas diferenças entre o potencial de dano de bolhas grandes e pequenas. O número e o diâmetro médio de cavidades na interface podem ser determinados por medidas diretas em filmes de alta velocidade. As fotografias mostram, ainda segundo KNAPP (IBDEM), que seu diâmetro médio fica em torno de 0,64 mm e sua velocidade média é ligeiramente superior à do fluxo líquido. Com base nestas medidas, aproximadamente $1,8 \times 10^8$ cavidades podem entrar em colapso por polegada de circunferência da amostra de teste por segundo. Comparada com a taxa média observada de 60 pontos de ataque por polegada por segundo, isto significa que apenas uma a cada 30.000 cavidades móveis produz dano no metal. Razões similares também foram observadas em testes em tubos de venturi e sistemas vibratórios. Ainda não foi bem esclarecido como e porque isto ocorre.

EISENBERG (1966) e GÜLICH (1987) apresentam metodologias para predição do ataque cavitacional e cálculo da perda de massa e profundidade da erosão, respectivamente.

2.3.6 - *Relação Entre as Propriedades dos Materiais e a Resistência à Cavitação*

Muitos estudos têm sido feitos para se determinar a relação entre as propriedades mecânicas dos materiais e a resistência ao dano cavitacional, já que se admite que este é preponderantemente causado por efeitos mecânicos.

EISENBERG (1966), KNAPP (1970) e KARIMI (1986) já apresentaram revisões do assunto. Um resumo das principais relações entre resistência ao dano cavitacional e propriedades é dado a seguir, segundo a análise deste último.

Embora a dureza tenha sido considerada como um bom indicador da resistência à cavitação, os resultados só são coerentes quando se compara materiais similares. Quando curvas para diferentes tipos de materiais ou ligas são superpostas, elas não coincidem e grande dispersão de resultados é observada.

A energia de deformação até a fratura ou tenacidade (definida como a área sob a curva tensão-deformação em tração) apresentou boa correlação em alguns estudos, e péssima em outros, com a resistência à cavitação, parecendo ser adequada como indicador de resistência apenas para materiais muito dúcteis.

A resiliência definida como o quociente entre o quadrado do limite de resistência e o dobro do módulo de elasticidade é um melhor indicador para materiais frágeis, representando neste caso a energia elástica absorvida até a fratura. De modo geral, materiais que apresentam alta tenacidade apresentam também boa resistência à erosão devida à cavitação.

Limite de escoamento, redução de área, coeficiente de encruamento e combinações destes parâmetros não apresentaram boa correlação com a resistência à cavitação

ABE (1989) propôs um modelo semi-empírico para cálculo da taxa máxima de dano a partir de parâmetros do ensaio de cavitação (frequência e amplitude) e propriedades do

material (limite de resistência, densidade, velocidade de propagação do som, módulo de Young).

RICHMAN e co-autor (1990), trabalhando com dados experimentais de diversos autores, concluíram que a erosão por cavitação é melhor descrita como um processo de fadiga, por parâmetros de deformação cíclica. Segundo eles, a resistência ao dano cavitacional medida tanto por um tempo de incubação como por uma taxa de perda de massa é determinada predominantemente pelo coeficiente de resistência à fadiga σ_f . Esta propriedade depende fortemente do encruamento cíclico, não podendo ser relacionada a nenhuma propriedade monotônica do material.

2.3.7 - Outras Variáveis que Influenciam o Dano Devido à Cavitação

EISENBERG (1966) e KARIMI (1986) apresentam revisões sobre o papel da corrosão na erosão por cavitação. De modo geral admite-se um efeito sinérgico destes dois fenômenos, de forma que a erosão total em sistemas sujeitos à corrosão e cavitação simultâneas é maior que a soma destes individualmente. Entretanto, resultados diferentes podem ser encontrados na literatura, como os de ENGELBERG (1972), e VYAS (1990). Este último, por exemplo, admite que, em certos casos, a ocorrência de cavitação pode reduzir o dano total em aços inoxidáveis submetidos à corrosão.

PALHAN (1977) observou um efeito potencializador das tensões de tração em aço doce e ferro fundido no dano cavitacional. Este efeito seria maior no ferro fundido e a diferença foi atribuída à microestrutura particular deste.

MADANIA (1993) observou que a presença de partículas em suspensão na erosão de válvulas controladoras de fluxo sujeitas à cavitação também potencializa o dano, de forma que o efeito total é muito maior que a soma dos efeitos individuais.

2.3.8 - O Ensaio Acelerado de Cavitação

Na literatura são citados diversos ensaios de desgaste por cavitação, que podem ser feitos em diferentes tipos de sistemas, os quais promovem ou não um fluxo do líquido no qual a cavitação ocorre (KNAPP, 1970; KARIMI, 1986; IWAI, 1991).

Num dos sistemas que utilizam fluxo do líquido, uma peça do material a ser ensaiado (normalmente um sólido de revolução) é inserida neste fluxo e uma região selecionada é observada periodicamente para acompanhamento da erosão. Em outro, um corpo de prova é inserido na parede de um tubo de venturi utilizado para provocar a cavitação. KARIMI (1989a) desenvolveu um equipamento que utiliza uma válvula rotativa e uma câmara especial para gerar cavitação em vórtex. Outro tipo ainda utiliza um disco girante, ao qual são afixados corpos de prova do material a ser testado, que fica submetido a um jato de líquido.

Nos sistemas que não utilizam fluxo, a cavitação normalmente é gerada por vibração ultra-sônica de um corpo de prova do material em teste, que fica parcialmente mergulhado no líquido.

Para cada tipo de ensaio, diversas variáveis podem influenciar os resultados e precisam ser rigorosamente controladas. A American Society for Testing Materials, desde 1972, propôs uma norma técnica específica para ensaio de erosão por cavitação vibratória, que foi revisada em 1977 e 1985 (ASTM, G-32). Contudo, GÜLICH (1987) afirma que os resultados destes ensaios não podem ser transferidos diretamente para bombas hidráulicas e que a predição do desgaste tem como base sua correlação com dados observados na operação de plantas por um longo período de tempo.

O dano cavitacional pode ser acompanhado pelo número de crateras produzidas por unidade de área por unidade de tempo, pelas variações de rugosidade da superfície ou, mais comumente, por medidas de perda de peso como função do tempo de exposição à cavitação.

Diferentes formas de curva taxa de erosão em função do tempo têm sido reportadas, dependendo das propriedades do material testado (dúctil, frágil, encruável, etc.), do tipo de

teste usado (venturi, disco giratório, dispositivos vibratórios, etc.) e das condições experimentais (temperatura, velocidade, etc.). As discrepâncias nas taxas de erosão de uma liga particular testada em equipamentos similares podem ser atribuídas a divergências no tipo de cavitação, a flutuações das condições experimentais durante os longos tempos de exposição e à utilização de ensaios não padronizados (KARIMI, 1986).

De modo geral, o resultado do ensaio de cavitação em dispositivos vibratórios mostra a existência de quatro estágios: períodos de incubação, de acumulação ou transição, estacionário e de atenuação (EISENBERG, 1966; OKADA, 1990), como mostrado na figura 2.3.6. Outros autores reconhecem até oito tipos diferentes de curvas de perda de massa em função do tempo (KARIMI, 1986).

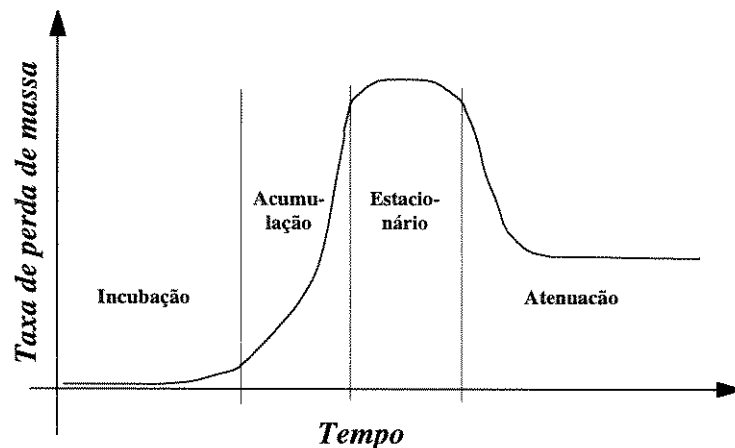


Fig. 2.3.6 - Curva típica de perda de massa com o tempo.

No período de incubação ocorre deformação superficial, com pouca ou nenhuma perda de massa. No período de acumulação a taxa de erosão aumenta até um nível máximo devido ao encruamento da superfície e ao desenvolvimento de fissuração, e é quando a erosão se estende sobre toda a área superficial. No período estacionário, relacionado ao ataque de uma superfície homogeneamente encruada, a taxa de erosão é máxima e este se estende por períodos relativamente longos ou também curtos, levando a um pico na curva. No período de atenuação a taxa de erosão decresce suavemente ou apresenta flutuações. Esta queda é associada à redução da pressão de colapso das bolhas na vizinhança de uma superfície rugosa e ao efeito de amortecimento pelo líquido retido nas reentrâncias da superfície erodida ou do ar ou vapor contido no líquido na zona de cavitação.

Na literatura há muitas especulações a respeito do significado e importância destes estágios na resistência ao ataque cavitacional dos materiais, como já verificado por KARIMI (1986), além de tentativas de se relacionar estes períodos com propriedades e características dos materiais, como por exemplo, a de RAO e colaboradores (1977).

O efeito dos parâmetros e condições de teste também têm sido citados. A temperatura, pressão e conteúdo de gás dissolvido no líquido têm efeito similar na taxa de erosão, que é um aumento desta com o aumento de qualquer daquelas variáveis, até um valor máximo, seguido de um abaixamento até valores bem baixos da taxa de erosão. O aumento da velocidade do líquido tende a aumentar a taxa de erosão e parece ser uma consequência do número de impactos por unidade de tempo. As causas para estes efeitos e a influência de outras variáveis têm sido citadas por vários autores, como AURET, 1993a,b; TOMLINSON, 1988 e PALHAN, 1977, por exemplo. Um resumo pode ser encontrado num texto de revisão de KARIMI (1986).

É difícil fazer uma comparação entre os resultados de diferentes tipos de testes de cavitação, devido às suas características espaciais e temporais. Testes cavitacionais hidrodinâmicos (venturi e disco rotativo) apresentam baixas taxas de erosão quando comparadas com aquelas observadas em dispositivos vibratórios. Os períodos estacionário e de atenuação observados neste último tipo de ensaio não são confirmados em testes tipo venturi ou na erosão em testes de campo. KARIMI (IBDEM) cita resultados de estudos comparativos realizados por sua equipe e por outros autores, principalmente quanto à evolução superficial de amostras submetidas a diferentes tipos de cavitação.

A figura 2.3.7. mostra a superfície típica de um corpo de prova de aço carbono submetido à cavitação vibratória (frequência de 20 kHz e amplitude de 50 μm) por cerca de 3 horas. A região próxima à periferia da amostra sofre pouco ataque. Na região mais interna, logo a seguir, podem-se observar crateras alongadas mais profundas, no sentido radial e na região mais central, crateras também profundas, que tendem a ser mais circulares. Em ambos os casos, estas se apresentam superpostas a uma superfície atacada de modo homogêneo.

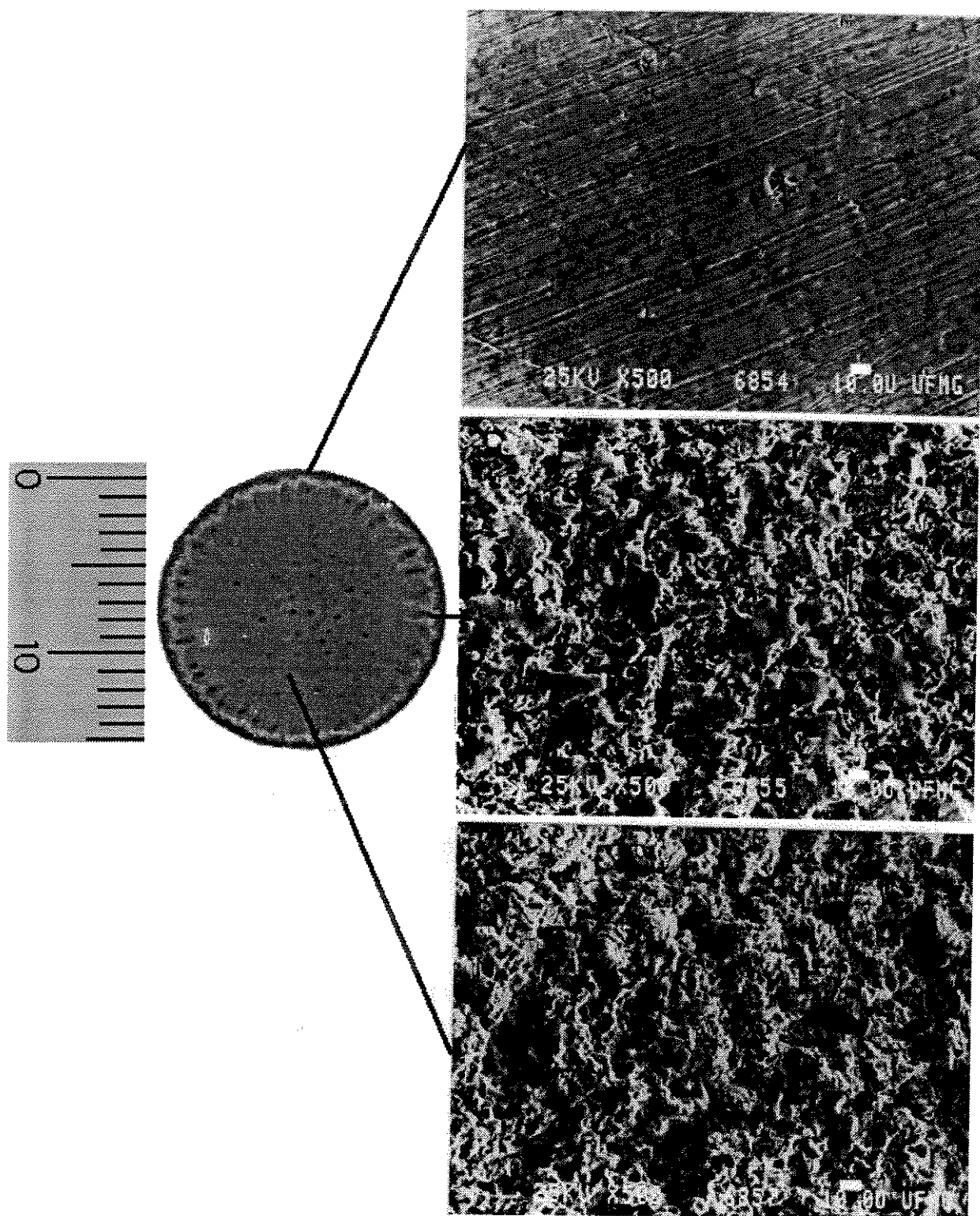


Fig. 2.3.7 - Superfície de CP de aço carbono submetido ao ensaio acelerado de cavitação vibratória.

Nos estágios iniciais do ensaio acelerado de cavitação vibratória de aço inoxidável AISI 304, AHMED (1991a) também observou um ataque mais acentuado na região a 6 mm do centro da amostra.

2.4 - Cavitação em Turbinas Hidráulicas

2.4.1 - Introdução

As turbinas hidráulicas estão sujeitas à cavitação e ao dano cavitacional (KNAPP, 1970, MACINTYRE, 1983). A ocorrência e intensidade do ataque cavitacional dependem principalmente do perfil hidrodinâmico e das condições de operação do equipamento.

Geralmente um protótipo reduzido de uma turbina projetada é construído e operado em condições semelhantes às que o equipamento real vai trabalhar. No modelo são identificadas as áreas sujeitas ao ataque cavitacional e a intensidade do ataque (ARAÚJO, 1995).

Na fabricação, as regiões susceptíveis são construídas ou recobertas com camadas especiais, geralmente aços inoxidáveis ou ligas à base de cobalto (os chamados “stellites”), por soldagem (BRANDÃO, 1995).

Contudo, muitas vezes o modelo não se comporta exatamente como a turbina real ou as condições de operação não são exatamente as mesmas durante toda a vida do equipamento, de forma que o dano cavitacional ocorre, tanto em áreas já protegidas ou mesmo em áreas nas quais não se previu nenhum ataque (ARAÚJO, 1995).

Assim, a manutenção preventiva ou corretiva tem um papel importante na minimização dos danos causados pela cavitação. Deve-se lembrar aqui que, na maioria das vezes, estas têm de ser realizadas em campo, em função do porte e das condições de trabalho destes equipamentos.

AKHTAR apresentou em 1986 uma revisão dos avanços na tecnologia de materiais pertinentes ao campo das turbinas hidráulicas em geral e em particular dos desenvolvimentos na fabricação e manutenção de grandes equipamentos.

2.4.2 - Cavitação em Turbinas Hidráulicas

A figura 2.4.1 mostra uma turbina hidráulica tipo Francis vista de baixo. Esta turbina tem 14 pás e comporta uma vazão de 11.000 m³ de água por segundo.

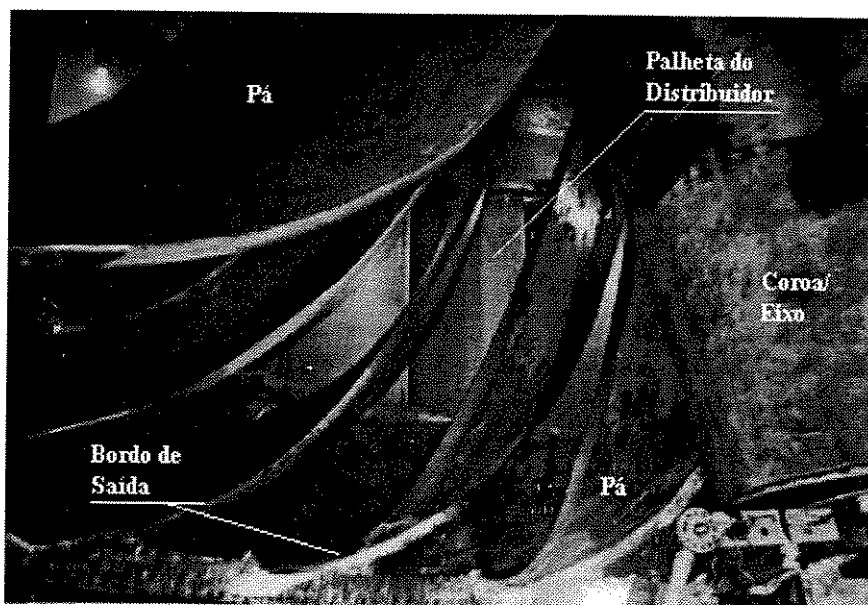


Fig. 2.4.1 - Vista inferior de uma turbina Francis.

A figura 2.4.2 mostra um detalhe da superfície inferior de uma pá e sua junção com a roda da turbina, regiões de baixa pressão, portanto sujeitas ao dano cavitacional, com camadas de revestimento em aço inoxidável, depositados por soldagem. Além destas regiões, as palhetas do distribuidor também estão sujeitas ao ataque pela cavitação, embora com menor intensidade.

A figura 2.4.3 mostra a superfície de uma outra pá desta mesma turbina, após cerca de 25.000 horas de operação depois da última parada para manutenção, onde se pode notar o dano causado pela cavitação tanto numa região adjacente à uma região revestida como na própria região supostamente protegida.

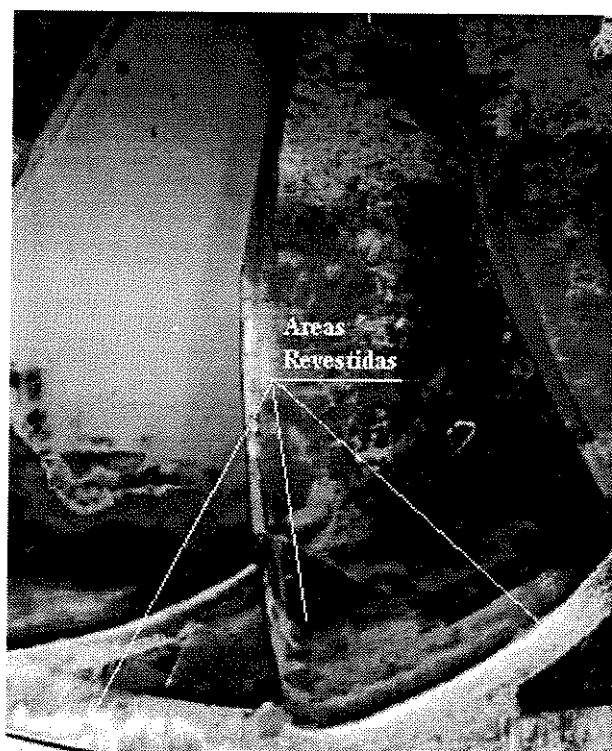


Fig. 2.4.2 - Detalhe da figura anterior, mostrando áreas protegidas

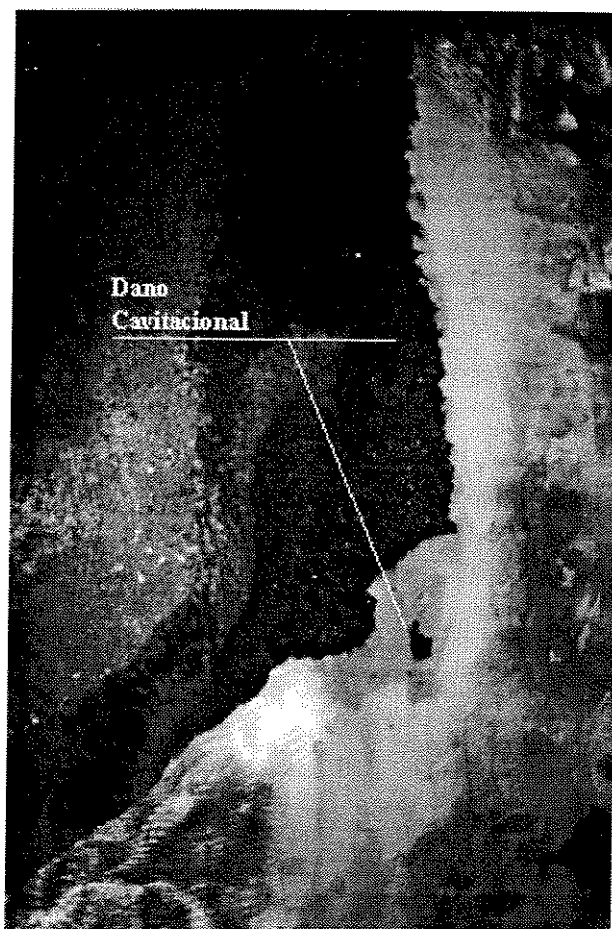


Fig. 2.4.3 - Superfície de outra pá da mesma turbina das figuras anteriores, que sofreu ataque cavitacional.

As causas prováveis do ataque são as condições de operação (vazão, carga, etc.) anormais e/ou perfil hidráulico inadequado. Diferenças de uns poucos milímetros na espessura ou contornos das pás podem ter um efeito significativo no favorecimento da ocorrência da cavitação (ARAÚJO, 1995).

RAABE (1985) apresenta um estudo detalhado da cavitação nas diversas regiões de uma turbina hidráulica e do efeito e importância dos diversos parâmetros de projeto e operação deste tipo de equipamento. São considerados aspectos teóricos do fenômeno de cavitação, da hidrodinâmica e das propriedades reais da água e do material das turbinas, relacionando extensa bibliografia sobre o tema.

2.5 - A Aspersão Térmica

2.5.1 - Generalidades

Aspersão térmica é um termo genérico para designar um grupo de processos que deposita materiais, metálicos ou não, finamente divididos em partículas com diâmetro entre 10 e 50 μm (THORPE, 1993), em um substrato adequadamente preparado, para formar um revestimento. Este material pode estar inicialmente na forma de pó, arame, vareta ou cordão e é aquecido durante o processo por uma chama, um arco elétrico ou um arco plasma, passando a um estado plástico ou fundido, e então acelerado por gases (HOWES Jr., 1994). A aceleração do material fundido produz um jato de partículas confinado que é transferido pelos gases ao substrato. Ao se chocarem com a superfície, as partículas se achatam, formando pequenas lentes que aderem ao substrato e entre si, se resfriam e formam um revestimento com estrutura lamelar. A figura 2.5.1 apresenta um desenho esquemático da seção transversal de um revestimento típico depositado por aspersão térmica.

A aspersão térmica é um processo sinérgico, no qual os componentes do sistema, parâmetros, funções e características desejadas para o revestimento precisam ser determinados para se selecionar o tipo de material e o equipamento necessários para o processo. Este deve ser ajustado para cada aplicação em particular, em função dessas

informações. Diferentes revestimentos podem ser obtidos pelo uso de diferentes combinações de equipamentos, parâmetros e consumíveis. Um sistema básico para aspersão térmica consiste de uma tocha para aspersão, uma fonte de energia, um sistema de controle de gases e um alimentador de arame ou pó (AWS, 1985).

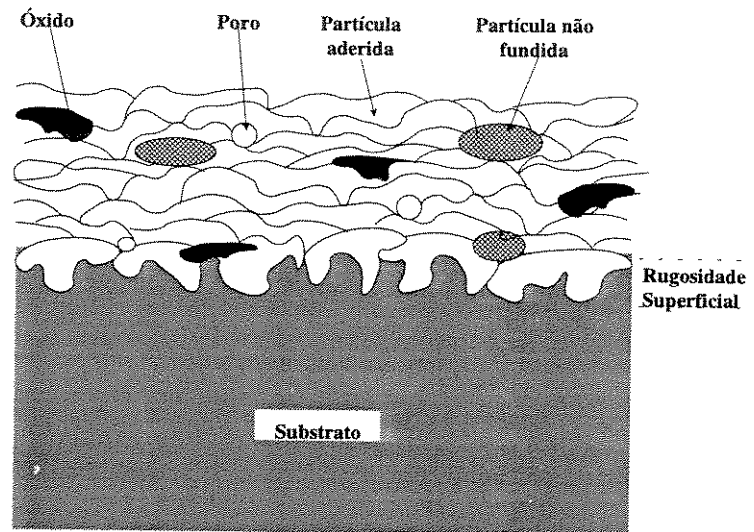


Fig. 2.5.1 - Seção transversal de um revestimento típico depositado por aspersão térmica. (Esquemático)

Uma característica importante da aspersão térmica é que a temperatura do substrato normalmente não atinge níveis elevados, permanecendo abaixo dos 150°C geralmente, o que permite sua aplicação em superfícies ou materiais previamente tratadas por outro processos termo-mecânicos.

Os principais processos de aspersão térmica são mostrados na figura 2.5.2, segundo uma classificação baseada na fonte de calor para se obter a fusão do material. Outras classificações mais completas, apresentando variações dos processos citados, podem ser encontradas na literatura (AWS, 1985; LUGSCHEIDER, 1991b; SMITH, 1994).

2.5.2 - A Aspersão Térmica por Combustão

A aspersão térmica por chama utiliza como fonte de energia o calor gerado na combustão de um gás. A princípio, qualquer substância que se funda e não se sublima abaixo

de 2750°C pode ser depositada por este processo, a partir de pós, arames, varetas ou cordões (tubo plástico cheio de pó). A Tabela 2.5.I apresenta a temperatura de chama máxima de alguns gases combustíveis. O mais usado é o acetileno.

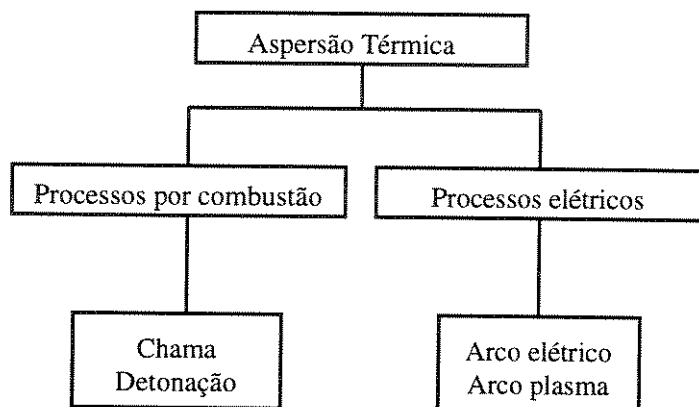


Fig. 2.5.2 - Principais processos de aspersão térmica.

Tabela 2.5.I - Temperatura de chama de alguns gases combustíveis (AWS, 1985)	
Gás	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2640
Gás natural + Oxigênio	2735
Hidrogênio + Oxigênio	2690
Acetileno + Oxigênio	3100

Uma variação deste processo muito usada na deposição de revestimentos resistentes ao desgaste é o de aspersão-fusão. Nesta técnica, após aspersão, o revestimento é fundido com uma chama (HERMAN, 1990). A aspersão térmica a chama tem sido intensivamente utilizada na manutenção em diversas áreas e contribuído para a redução dos custos (AWS - WJ, 1992).

O equipamento básico utilizado na aspersão por chama é mostrado na figura 2.5.3 e consiste basicamente de cilindros de oxigênio e combustível dotados de reguladores/medidores de pressão e/ou vazão, fonte de ar comprimido e uma tocha. Esta é

diferente, dependendo se o material do revestimento está na forma de arame e similares (cordão e vareta) ou pó.

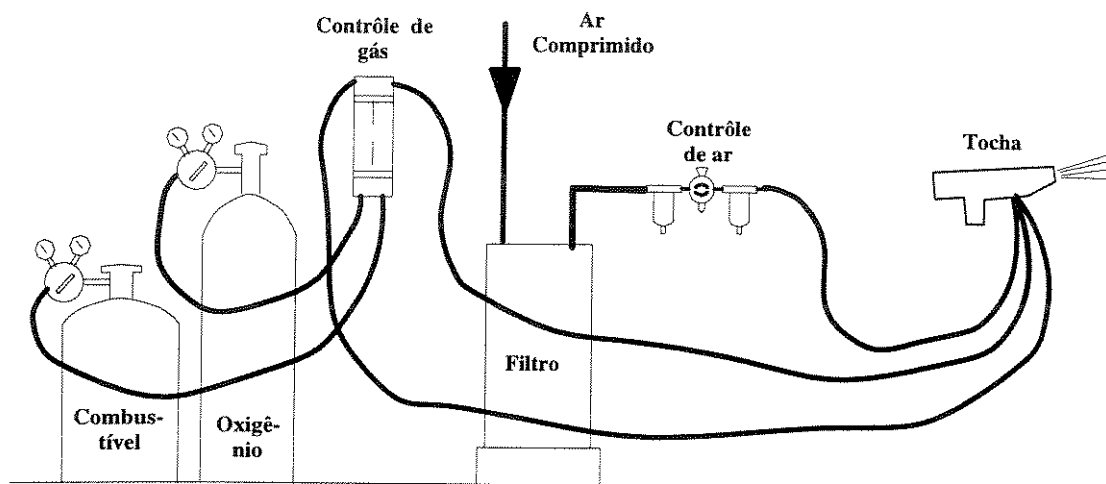


Fig. 2.5.3 - Equipamento básico para aspersão por chama. (Esquemático)

No caso de utilização de arames ou cordões, um suporte apropriado para os rolos destes é necessário. O material a ser aspergido é inserido na parte posterior da tocha e tracionado por um motor elétrico ou a ar comprimido, com velocidade ajustável, e alimentado coaxialmente à chama. Um jato de ar comprimido é utilizado para atomizar o material fundido pelo calor de combustão e acelerá-lo em direção ao substrato. Em aplicações especiais, o ar pode ser substituído por um gás inerte.

Tochas para aspersão de pós a chama são, em geral, mais leves e compactas que para outros tipos de equipamentos para aspersão térmica, contudo, devido à menor velocidade alcançada pelas partículas, os revestimentos depositados por este processo apresentam pior adesão e maior porosidade, comparados com os outros.

O pó pode ser de um metal puro, uma liga, um composto, um cerâmico, um carboneto ou combinações destes. O recipiente no qual é colocado o pó pode ser parte da tocha ou conectado a ela. Uma pequena quantidade de gás é usada para arrastar o pó para o jato da mistura oxigênio-combustível. Algumas variações possíveis neste processo são a utilização de gás comprimido para a alimentação de pó e de ar comprimido para acelerar as partículas

fundidas. Às vezes, o revestimento aspergido a partir de pós é fundido por uma chama após a sua aplicação, visando diminuir sua porosidade e aumentar sua densidade.

Em todos os processos de aspersão térmica de pós, a taxa de alimentação e a velocidade das partículas afetam a estrutura e a eficiência do revestimento. Se o material não é suficientemente aquecido, o revestimento conterá partículas não fundidas e maior quantidade de poros. Se a velocidade das partículas é muito lenta, pode haver alguma volatilização, aumentando os custos. Em ambos os casos, o desempenho do revestimento fica comprometido.

A aspersão por detonação foi um processo desenvolvido principalmente para a deposição de revestimentos duros à base de carbonetos. A tocha para este processo, cujo esquema é mostrado na figura 2.5.4, difere das tochas por combustão por utilizar a energia devida a explosões da mistura oxigênio-acetileno, ao invés de uma chama estacionária, resultando num revestimento muito mais denso e aderido ao substrato. Ela consiste basicamente de um tubo comprido, no qual é introduzida uma mistura de gás combustível, oxigênio e pó. Quando é feita a ignição da mistura, uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é de 760 m/s aproximadamente. Após cada injeção de mistura, uma certa quantidade de nitrogênio é introduzida no tubo. Ocorrem várias detonações por segundo, gerando um ruído da ordem de 150 dB.

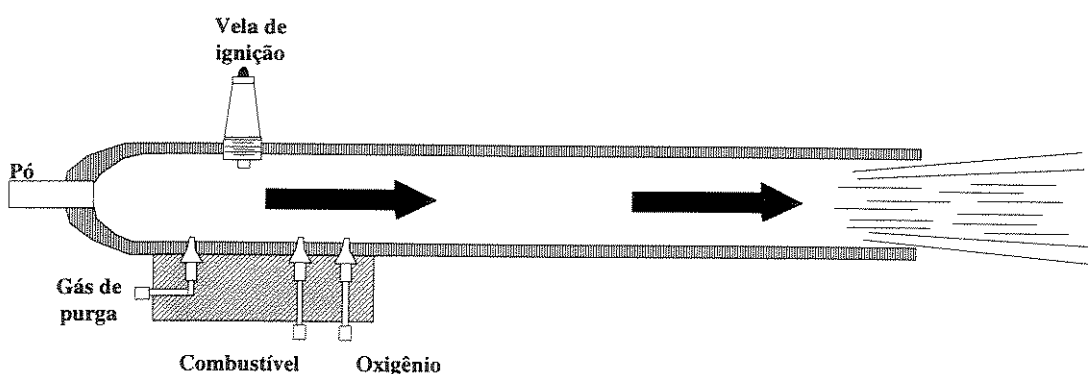


Fig. 2.5.4 - Tocha de detonação (Esquemática).

Este processo é, em geral, mecanizado. IRVING e co-autores (1993) apresentam uma revisão do desenvolvimento deste processo e de suas diversas variações. THORPE (1991),

STURGEON (1994) e HARVEY (1995) apresentam características, vantagens e aplicações da variação HVOF (High-Velocity Oxy Fuel).

2.5.3 - A Aspersão Térmica Elétrica

No processo a arco, dois arames eletrodos consumíveis, isolados entre si, avançam até um ponto de encontro onde são atomizados por um jato de gás, em geral ar comprimido. Uma diferença de potencial de 18 a 40 volts é aplicada entre eles, de forma a estabelecer um arco que funde a ponta dos arames. As partículas fundidas atomizadas são ejetadas na forma de aerosol.

O equipamento básico para este processo consiste de uma fonte de corrente contínua tipo tensão constante, alimentadores de arame do tipo velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável. Os arames utilizados são, em geral, de grande diâmetro, da ordem de 5 mm. Este processo experimentou um avanço recente com o desenvolvimento de arames tubulares com enchimento metálico (SAMPSON, 1993). A figura 2.5.5 ilustra esquematicamente o processo.

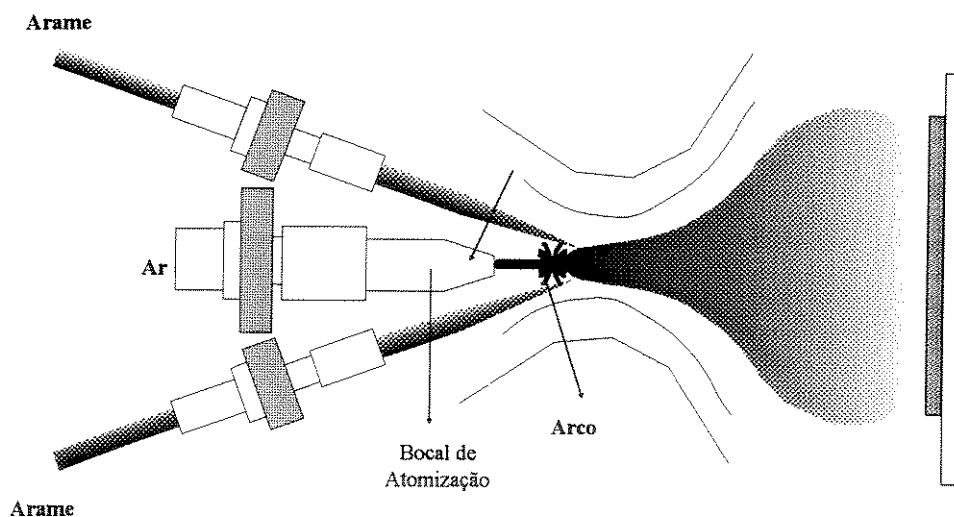


Fig. 2.5.5 - Tocha para aspersão a arco elétrico (esquemática).

No processo plasma, pode-se usar sistemas com arco transferido (o substrato faz parte do circuito elétrico do arco plasma) ou não transferido (arco aberto entre um eletrodo não

consumível e o bocal), podendo operar manual ou mecanizadamente. As tochas plasma são, em geral, refrigeradas a água.

No primeiro caso, o processo se assemelha à soldagem, já que há a formação de uma poça de fusão e diluição do material depositado, com todas as suas conseqüências, com o metal do substrato. Sua aplicação é limitada a revestimentos metálicos em substratos metálicos. O equipamento utilizado neste processo é semelhante ao utilizado em soldagem, com exceção da tocha, obviamente. A aspersão a arco plasma não transferido pode ser utilizada em qualquer tipo de substrato e na aspersão de qualquer tipo de material.

A quantidade de calor gerada e a velocidade das gotículas é controlada pelos parâmetros de operação do sistema (corrente, tensão, vazão de gás, etc.), tipo de gás e pelo tipo e dimensões do bocal. Como gás de plasma normalmente se usa o argônio ou nitrogênio e um gás secundário, como o hidrogênio ou hélio, pode ser usado para aumentar a potência e/ou a velocidade do plasma. A figura 2.5.6 apresenta um esquema de um sistema básico para aspersão a plasma.

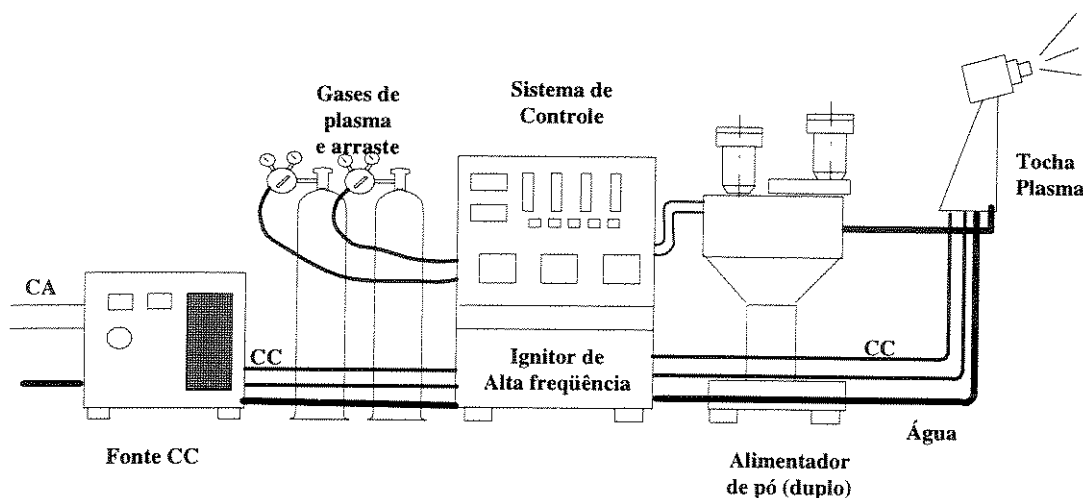


Fig. 2.5.6 - Sistema para aspersão térmica a plasma (esquemático).

O processo plasma é utilizado normalmente com pó. MARANTZ (1991) fala no desenvolvimento de um sistema plasma para deposição a partir de arames, que já estaria disponível comercialmente.

A Tabela 2.5.II apresenta uma comparação entre as principais características dos diversos processos de aspersão térmica, segundo THORPE (1993).

Tabela 2.5.II - Comparação de características de processos de aspersão térmica. (THORPE, 1993)												
Processo	Característica	Vazão de gases (m3/h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)		11	2200	CO, CO2, H2O	30	3	Baixa	6	3	7	25 - 75	11 - 22
Chama (Arame)		71	2800	N2, CO, CO2, H2O	180	4	Média	4	3	9	50 - 100	11 - 22
Arco (Arame)		71	5500	N2, O2	240	6	Alta	0,5 - 3	1	16	4 - 6	0,2 - 0,4
Plasma		4,2	5500	N2, Ar, H2, O2	240	6	Alta	0,5 - 1	5	5	30 - 80	13 - 22
Detonação		11	3900	N2, CO, CO2, H2O	910	8	Muito Alta	0,1	10	1	100 - 270	220
HVOF		28 - 57	3100	N2, CO, CO2, H2O	610 - 1060	8	Muito Alta	0,2	5	14	100 - 270	22 - 200
Plasma de alta energia		17 - 28	8300	N2, Ar, H2, O2	240 - 1220	8	Muito Alta	0,1	4	23	100 - 250	9 - 13
Plasma a vácuo		8,4	8300	Ar, He	240 - 610	9	Muito Alta	ppm	10	10	50 - 100	11 - 22

Em qualquer dos processos de aspersão térmica, uma etapa extremamente importante é a preparação da superfície. A limpeza e a rugosidade superficial influenciam de forma decisiva a aderência do revestimento. A limpeza é feita normalmente utilizando-se vapores de solvente; decapagem química; aquecimento em forno; ação mecânica, com uso de escovas ou abrasivos ou ainda utilizando um sistema ultra-sônico.

A rugosidade adequada pode ser conseguida por jateamento com abrasivos (areia, gralha de aço e óxido de alumínio são os mais usados). Muitas vezes se utiliza ainda uma camada de revestimento metálico inicial, em geral com liga à base de Ni (com Cr e/ou Al), visando melhorar a aderência. A figura 2.5.7 mostra o aspecto de partículas de óxido de alumínio usadas neste trabalho para preparação das superfícies para aspersão térmica, sem uso e após algumas horas de uso, como observadas ao microscópio eletrônico de varredura.

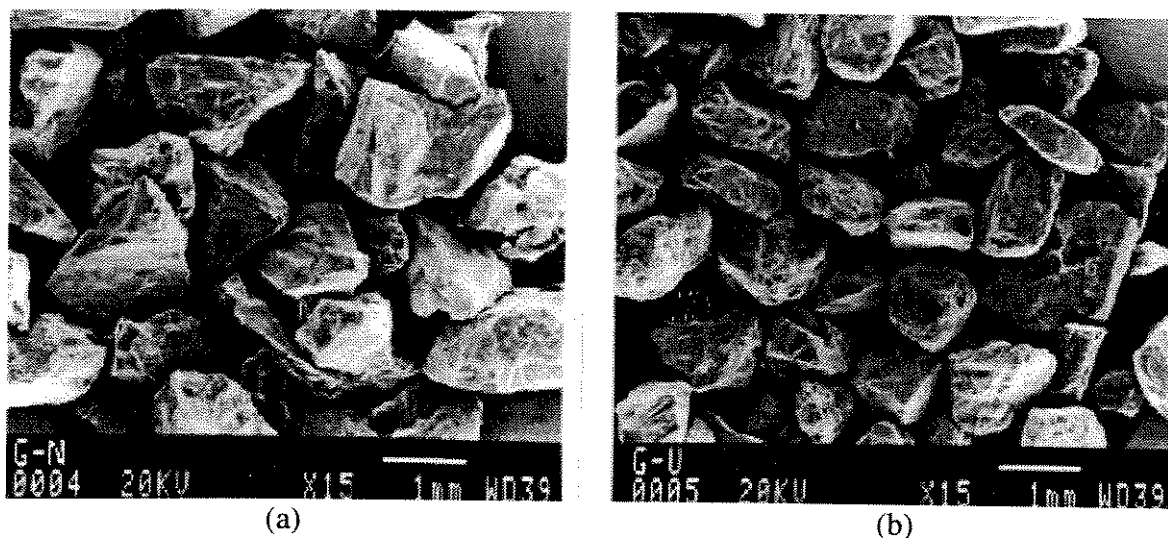


Fig. 2.5.7 - Partículas de óxido de alumínio para jateamento (a) sem uso e (b) após algumas horas de uso. MEV.

Outra característica decisiva é espessura depositada, que varia dependendo do material aspergido. Em geral, camadas cerâmicas só podem ser aplicadas com espessuras, no máximo, da ordem de 0,5 mm, enquanto camadas metálicas podem ir além de 1 mm. Isto se deve principalmente à diferença nos coeficientes de dilatação térmica do substrato e do revestimento, que é a causa principal do aparecimento de intensas tensões internas na interface.

2.5.4 - Pós Para Aspersão Térmica

Os pós para aspersão térmica podem ser fabricados por diferentes métodos, resultando em produtos com equivalentes composição química e distribuição granulométrica mas com diferentes forma, densidade e pureza. Estas, por sua vez, podem levar a revestimentos aspergidos com propriedades significativamente diferentes. Os principais métodos de fabricação são (KUBEL Jr., 1990): atomização, aglomeração e sinterização, fusão e britagem e "composição" (compositing).

A atomização é freqüentemente usada para produzir ligas à base de ferro, cobalto, níquel, e alumínio, utilizando água ou gás. Pós atomizados com gás apresentam forma esférica (figura 2.5.8 - a), enquanto pós atomizados com água (figura 2.5.8 - b) tendem a ser mais irregulares e pontiagudos.

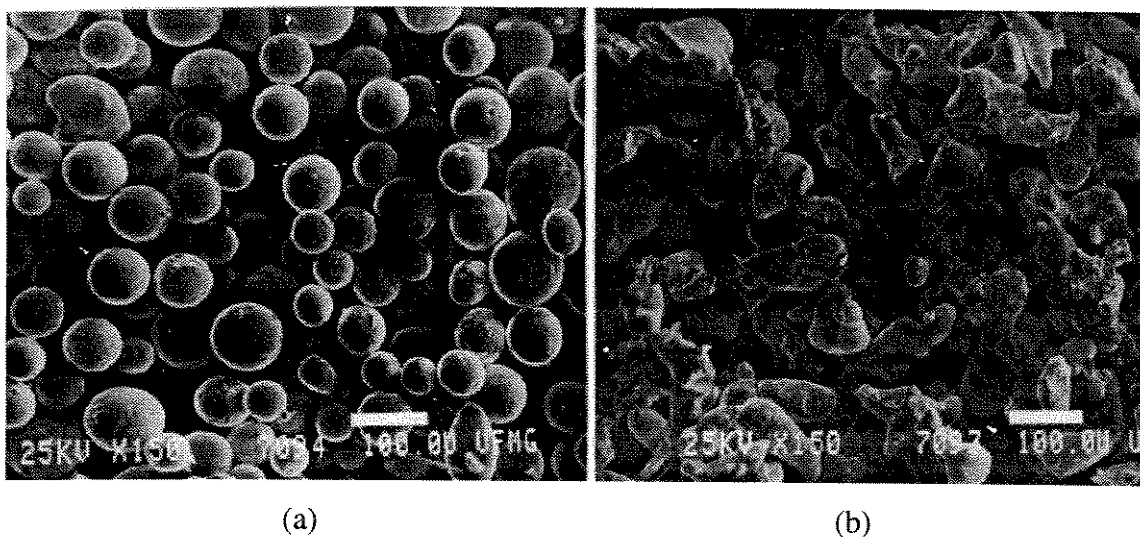


Fig. 2.5.8 - Pós para aspersão térmica atomizados (a) a gás e (b) a água. MEV.

Fusão e britagem são usadas para produzir pós cerâmicos, carbonetos e algumas ligas metálicas frágeis. Variações nas taxas de solidificação resultam em diferenças de estrutura cristalina e a britagem posterior produz partículas de diferentes formas e densidade aparente.

A aglomeração, usada para produzir materiais cerâmicos, carbonetos e alguns pós metálicos, é obtida por pelletização e prensagem ou secagem por aspersão ("spray drying"), resultando em partículas com grandes diferenças em área superficial e densidade.

A composição, isto é, a união de dois ou mais materiais diferentes formando uma única partícula, cada um mantendo sua própria identidade, pode ser obtida por revestimento químico, ligação orgânica ou sinterização. Compósitos Ni-Al são usualmente fabricados por este método. Os pós obtidos por aglomeração e composição tendem a ser aproximadamente esféricos. A figura 2.5.9 mostra a aparência de pós moídos e peneirados.

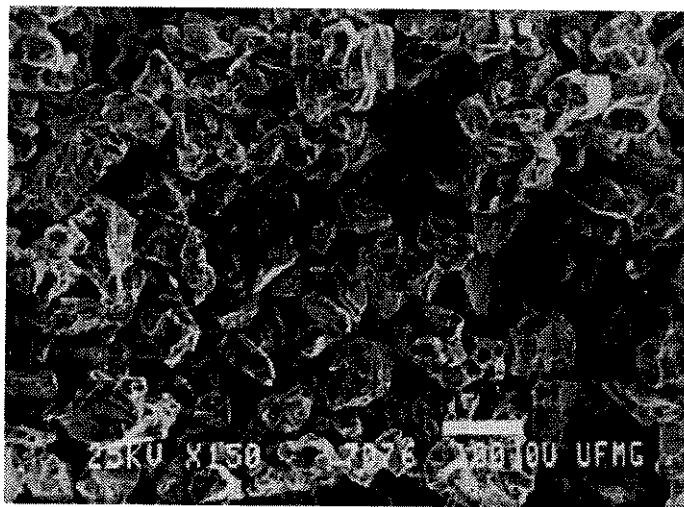


Fig. 2.5.9 - Aparência de um pó para aspersão térmica moído e peneirado. MEV.

Segundo LUGSCHEIDER e colaboradores (1991b), novos processos de modificação e refino dos pós têm se tornado importantes, tais como micro-pelotização, revestimento químico, esferoidização e densificação. Ainda segundo estes autores, os pós para aspersão térmica são geralmente caracterizados em termos de tamanho das partículas, distribuição granulométrica, forma, composição química, conteúdo de gás e nível de outras impurezas.

Durante seu voo até o substrato, a composição química do pó pode se alterar, como consequência de sua interação com o ambiente. Estas alterações podem influenciar as propriedades do revestimento (AMBROZ, 1991). FINCKE (1994) estudou diferenças entre o processo HVOF e plasma sob este aspecto na deposição de revestimentos do tipo WC-Co. VARACALLE Jr. (1991) desenvolveu um modelo analítico para estudo das interações gás partícula e atributos do revestimento no processo plasma.

Cerca de 70 diferentes pós disponíveis comercialmente no mercado mundial, suas principais características e aplicações são citados e classificados por MATEJKA (1989).

WU (1994) caracteriza microestruturalmente cinco categorias de ligas de Ni e Co para aspersão térmica e discute suas diferenças e similaridades, orientando sua aplicação na prevenção de desgaste.

2.6 - Cavitação em Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica

Poucos estudos sobre os efeitos da cavitação sobre revestimentos aplicados por aspersão térmica foram encontrados na literatura e os encontrados ainda apresentaram resultados conflitantes. De modo geral, é ressaltado que o desempenho de tais revestimentos depende fortemente de sua adesão ao substrato e que esta depende fundamentalmente da preparação do substrato para a aspersão, mas estes aspectos não foram explorados nestes estudos.

A aspersão térmica a plasma de revestimentos não metálicos é reconhecida como tendo potencial na prevenção do dano cavitacional em turbinas hidráulicas por AKHTAR (1982), a despeito da facilidade de nucleação e coalescência de microtrincas em revestimentos de óxidos. Foram testados revestimentos cerâmicos à base de alumina (98%), alumina/titânia (87/13%) e óxido de cromo (92%, 5%SiO₂, 3%TiO₂) em substrato de aço baixo carbono (0,2%).

ASAHI e colaboradores (1976) apresentam alguns resultados obtidos com aços inoxidáveis 304 depositados com chama (arame) e plasma e 403 (arame), ligas à base de cobalto (plasma) e ligas auto-fluxantes de níquel e níquel-cromo (pós) em substrato de aço fundido com cerca de 13%Cr. As ligas fundidas de níquel apresentaram melhor resultado, mas com certa tendência ao trincamento quando aplicadas em revestimentos com espessura de cerca de 1,0 mm. Esta tendência foi reduzida com a adição de molibdênio. Uma liga com 30%Mo, 1,22%B, 1,68%Si e o restante Ni foi aplicada a uma turbina hidráulica feita do material do substrato testado e após três anos de operação ainda apresentava boas condições.

Num estudo mais completo feito para a Canadian Electrical Association (CEA No. 136 G 274, 1987), a B. C. HYDRO and Power Authority (1987) testou revestimentos metálicos, cerâmicos e poliméricos aplicados por plasma, tanto em laboratório como no campo, para proteção ao dano cavitacional. Concluiu-se que revestimentos aspergidos por plasma apresentam boa resistência e que muitos materiais brutos retêm sua capacidade de resistir à

cavitação quando aspergidos por plasma. Também foi observada a importância da adesão do revestimento ao substrato, que é melhor avaliada em testes de resistência ao cisalhamento que à tração em alguns casos e que o ensaio de cavitação por meio de vibração não é sensível a diferenças de adesão. Após pelo menos um ano de operação, encontrou-se desde apenas traços de revestimento até áreas relativamente grandes ainda revestidas nos testes de campo. A aderência do revestimento conseguida com o processo plasma foi julgada insuficiente para a recuperação de equipamentos operando sob grandes lâminas d'água.

GUO (1986) testou quatro revestimentos de ligas tipo WC/Co depositados por plasma, utilizando pós com diferentes composições químicas e técnicas de fabricação. O desempenho dos revestimentos mostrou-se dependente do método de fabricação do pó, sua composição, sua microestrutura (tamanho de grão, presença de poros e partículas não fundidas) e da rugosidade da superfície testada.

TAKEDA (1993) testou revestimentos de ligas à base de cobalto e do tipo $Zr_2B-CoCrAlY$ depositados por plasma em câmara a baixa pressão (LPPS- Low Pressure Plasma Spraying) em comparação com uma chapa de Stellite-6. O revestimento de composição similar apresentou um desempenho muito melhor que o Stellite-6, o qual foi atribuído à microestrutura resultante da rápida velocidade de resfriamento na aspersão térmica.

2.7 - Rugosidade Superficial

A rugosidade de uma superfície consiste nos sulcos ou marcas deixadas pelas ferramentas ou peças que entraram em contato com esta e se encontram superpostas ao seu perfil. Ela pode ser medida através de diversos tipos de aparelhos, com ou sem contato, chamados rugosímetros. A norma brasileira ABNT NBR 6405 (1988) define alguns parâmetros utilizados nesta medição, utilizando-se um sistema de apalpamento através de dispositivos eletromecânicos, tomando-se como referência uma linha média, chamado sistema M:

a) a linha média é definida como uma linha paralela à superfície, dentro do percurso de medição lm , de modo que a soma das áreas superiores seja exatamente igual à das áreas inferiores;

- b) o percurso inicial l_v é a extensão da primeira parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média, não utilizado na avaliação. Este trecho tem por finalidade permitir o amortecimento das oscilações elétricas e mecânicas iniciais do sistema de medição e a centragem do perfil de rugosidade;
- c) o percurso de medição l_m é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade, projetado sobre a linha média, usado diretamente na avaliação;
- d) o comprimento de amostragem l_e é tomado como sendo um quinto do percurso de medição e deve conter todos os elementos representativos da rugosidade e eliminar aqueles inerentes ao perfil, daí ser de grande importância a sua escolha;
- e) o percurso final l_n é a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média, não utilizado na avaliação. Este trecho tem por finalidade permitir o amortecimento das oscilações elétricas e mecânicas finais do sistema de medição;
- f) o percurso de apalpamento l_t é a soma dos percursos inicial, de medição e final;
- g) a rugosidade média R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição;
- h) a rugosidade média R_z é a média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial Z_i , definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média, dentro de um comprimento de amostragem.
- i) a rugosidade máxima $R_{máx}$ é o maior valor de rugosidade parcial Z_i que se apresenta dentro do percurso de medição.

A Tabela 2.7.I apresenta os valores recomendados pela ABNT para medida de R_a em perfis aperiódicos e a figura 2.7.1 ilustra os conceitos acima definidos.

Tabela 2.7.I - Comprimento de amostragem para a determinação de R_a em perfis aperiódicos (NBR 6405).		
Rugosidade - R_a (μm)	Comp. de Amostragem l_e (mm)	Percurso de Medição l_m (mm)
Até 0,1	0,25	1,25
de 0,1 até 2	0,80	4,00
de 2 até 10	2,50	12,50
Acima de 10	8,00	40,00

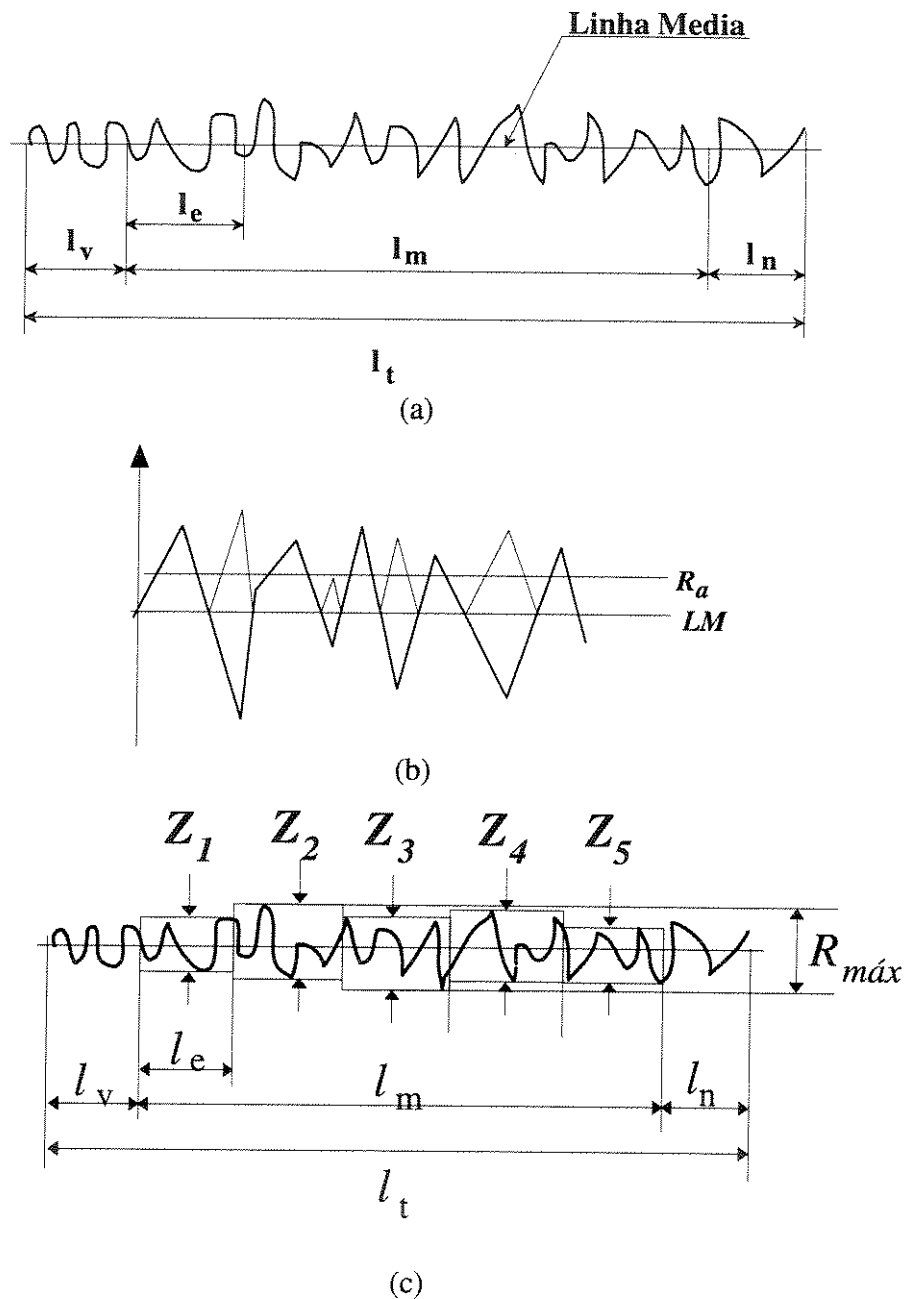


Fig. 2.7.1 -Definições de parâmetros associados à medida de rugosidade.
 (a) linha média, l_v , l_e , l_m , l_n , e l_t ; (b) linha média e R_a e (c) Z_i e $R_{máx}$.
 (Adaptado de NOVASKY, 1994)

2.8 - Planejamento e análise experimental

2.8.1 - Introdução

Nos últimos anos tem-se intensificado o uso de técnicas estatísticas no planejamento e análise experimental nas pesquisas científicas e tecnológicas. Segundo LUGSCHEIDER

(1991a), tais técnicas permitem o estudo e análise de complexos fenômenos influenciados por um grande número de variáveis como a deposição otimizada de revestimentos por aspersão térmica, com o mínimo esforço.

Para BUTTON (1994), o delineamento experimental tem como um de seus objetivos a determinação de número ideal de experimentos que leve à obtenção de resultados com determinado grau de confiabilidade, sujeito a limitações em relação aos equipamentos, materiais e instalações disponíveis, às características intrínsecas destes e aos recursos financeiros. A análise de dados experimentais nas mesmas bases permite tirar conclusões quantitativamente objetivas, associadas a um determinado grau de confiança previamente estabelecido.

CORRÊA (1992) ressalta que o uso das técnicas estatísticas de planejamento e análise experimental resulta nos seguintes benefícios: redução no número de ensaios, sem prejuízo da qualidade da informação; estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; determinação da confiabilidade dos resultados; seleção de variáveis com um número reduzido de ensaios e modelamento matemático do fenômeno estudado.

Assim, a realização de estudos baseados em técnicas estatísticas caracteriza-se por ser um processo gradual, realizado em etapas, em que os novos ensaios vão sendo definidos a partir dos resultados anteriormente obtidos, num processo iterativo. Particularmente, a técnica fatorial tem sido intensamente utilizada em trabalhos experimentais envolvendo soldagem e processos afins, como os de HARRIS (1983), MODENESI (1990), ALFARO (1993) e STARLING (1994), com excelentes resultados.

Neste trabalho pretende-se usar técnicas de planejamento e principalmente de análise experimental. Um resumo do assunto é apresentado a seguir.

2.8.2 - *Planejamento Experimental*

Um dos objetivos do planejamento é a otimização do número de ensaios a serem realizados, de modo a minimizar os erros experimentais e maximizar as informações colhidas. Existem vários procedimentos padronizados para a esta otimização.

O método do Quadrado Latino consiste de um arranjo quadrado $p \times p$, onde os níveis de uma variável cujo efeito se deseja estudar são representados por letras latinas, sendo que cada letra só pode aparecer uma vez em uma linha ou coluna. As linhas e colunas representam outras variáveis cujo efeito se quer isolar. Uma desvantagem deste método é o pequeno número de graus de liberdade, que pode ser contornado pelo uso de replicagem.

O planejamento por quadrados Greco-Latinos resulta da superposição de dois quadrados latinos $p \times p$. As letras gregas e latinas referem-se aos níveis das variáveis cujo efeito se quer determinar. A restrição que se impõe é que cada letra grega só apareça uma vez ao lado de cada letra latina. Com este procedimento pode-se estudar quatro variáveis de uma vez, com p níveis cada.

Quando há escassez de recursos, pode não ser possível a utilização de um planejamento completo como os anteriores. Nestes casos, modelos como os aleatorizados por blocos são recomendados.

O planejamento experimental Fatorial é provavelmente o mais usado, e se aplica quando os efeitos de duas ou mais variáveis devem ser investigados, particularmente quando o efeito de uma depende do nível das outras. Ele é especialmente indicado para o início do processo investigatório, na definição das variáveis mais influentes no fenômeno estudado, mas os resultados obtidos não podem ser extrapolados para níveis não pesquisados no planejamento. Neste método se utilizam combinações de todos os níveis de todas as variáveis testadas, com ou sem replicagem. Planejamentos fatoriais incompletos também podem ser usados, mas são mais limitados.

Os modelos estatísticos correspondentes aos vários planejamentos experimentais e os respectivos testes de hipóteses para análise podem ser encontrados na literatura, por exemplo, em MONTGOMERY (1991).

2.8.3 - *Análise Experimental*

Sejam μ_1 e μ_2 os valores médios de uma característica qualquer de dois conjuntos de corpos de prova (CP's) respectivamente com n_1 e n_2 elementos e σ_1 e σ_2 as variâncias dos valores desta característica nestes conjuntos. Pode-se testar estatisticamente a igualdade destas médias, ou em outras palavras, a equivalência destes dois conjuntos em termos da característica testada, com confiança de $(100-\alpha)\%$, calculando-se o valor de Z_0 e comparando-o com o valor de $Z_{\alpha/2}$, sendo

$$Z_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.1)$$

e $Z_{\alpha/2}$ é igual ao valor distribuição de Student com $n_1 + n_2$ graus de liberdade (MONTGOMERY, 1991). Se o valor absoluto de Z_0 for maior que o de $Z_{\alpha/2}$, a igualdade não poderá ser aceita. Se a diferença entre os dois conjuntos for a de que cada um tenha sido obtido com, por exemplo, distintos valores de uma variável ou condição, o efeito deste parâmetro na característica estudada poderá ser avaliado.

O número ideal de CP's em cada grupo também pode ser estimado a partir de um conjunto conhecido de valores experimentais, usando-se a distribuição de Student, fazendo-se

$$n = \left(t \frac{S}{\delta} \right)^2. \quad (2.2)$$

Partindo-se do desvio padrão S de um conjunto conhecido de N elementos, do valor de t da distribuição de Student com $N-1$ graus de liberdade e um intervalo de confiança $(100-\alpha)\%$

desejado e do erro absoluto admissível δ da grandeza observada, determina-se novo valor de n . Este é utilizado para cálculo de um novo valor de t , que novamente é usado no cálculo de n e assim sucessivamente até a estabilização do valor de n , que será o tamanho ideal da amostra para as condições (erro admissível e intervalo de confiança) impostas.

Quando numa amostra, avalia-se que os resultados de uma ou mais réplicas são questionáveis, pode-se usar o Procedimento de Chauvenet para rejeitar ou manter estes dados na amostra. Este consiste no cálculo da razão de desvio padrão DR , mostrada na equação (2.3), para cada elemento do conjunto, que é posteriormente comparada a uma razão padrão DR_0 , que por sua vez é função do tamanho da amostra. O dado é rejeitado se $DR > DR_0$, e novos valores para a média e o desvio padrão devem ser calculados. Se muitos valores são rejeitados, é sinal que a instrumentação usada é inadequada ou que a característica estudada é extremamente variável.

$$DR = \frac{y - \bar{y}}{S}, \text{ onde} \quad (2.3)$$

Y é o valor testado e $\bar{y}$ é a média e S o desvio padrão do conjunto, respectivamente. A Tabela 2.8.I mostra valores de DR_0 para alguns tamanhos de amostras.

Tabela 2.8.I - Valores de DR_0	
Número de elementos da amostra	Razão Padrão DR_0
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81

Modelos estatísticos mais elaborados, como a análise de variância, podem ser usados para avaliação qualitativa e quantitativa dos efeitos de diferentes variáveis sobre uma determinada característica, que podem ou não ser extrapolados para um universo maior de

dados, dependendo da escolha dos elementos do conjuntos utilizados na análise. Esta, por sua vez, pode ser simplificada pela elaboração de planejamentos experimentais baseados em técnicas estatísticas. WANG (1994) desenvolveu um sistema especialista (Expert System) aplicável à seleção de variáveis para aspersão térmica e sugestão de modelos de planejamento experimental para estudo de seus efeitos.

2.9 - Conclusão

Como se viu, a cavitação e suas conseqüências são um problema sério para as indústrias de geração hidrelétrica, exigindo destas um gasto de centenas de milhares de dólares anuais na sua prevenção e recuperação de equipamentos.

Embora tenha sido muito estudada, muitas dúvidas sobre a cavitação ainda permanecem. Apesar disto, também muitos conhecimentos já foram obtidos no sentido de orientar a prevenção e/ou minimização do dano cavitacional.

As medidas possíveis neste sentido na área de projeto geralmente resultam em diminuição da eficiência dos equipamentos, tornando-se inviáveis, particularmente do ponto de vista econômico. Quanto às condições de operação, nem sempre é possível mantê-las dentro de limites ótimos, em função da demanda diferenciada ao longo do tempo. A alternativa mais usada é a proteção das áreas mais sensíveis ao problema com camadas de materiais mais resistentes ao ataque cavitacional.

Estas camadas de revestimento normalmente são de aço inoxidável austenítico ou martensítico ou de ligas especiais à base de cobalto (também chamadas de “stellites”), depositadas por soldagem. O principal problema com estes tipos de revestimento é a necessidade de deposição de várias camadas de revestimento, em função da diluição, e a manutenção do perfil hidrodinâmico das partes revestidas, que exige normalmente retirada de material pós-revestimento e é difícil de ser feita e controlada, aumentando os custos.

A aspersão térmica tem se desenvolvido muito nos últimos anos e em função disto o seu campo de aplicação tem sido grandemente ampliado. Este desenvolvimento tem se dado tanto no aperfeiçoamento de técnicas e equipamentos de aspersão, de técnicas e processos de fabricação de consumíveis quanto no desenvolvimento de novos processos de aspersão, novas técnicas de fabricação de consumíveis e de novos materiais e ligas.

A aspersão térmica aparece como uma alternativa interessante para deposição de revestimentos, por ser uma técnica bastante versátil em termos de materiais aplicáveis e permitir a deposição de camadas de baixa espessura e alto desempenho, minimizando a necessidade de remoção de material e diminuindo custos, a princípio. Várias tentativas de utilização desta técnica mostraram que ela tem potencial para utilização na manutenção de turbinas hidráulicas, mas este não foi, entretanto, muito explorado. As causas para isto não são bem conhecidas, embora algumas hipóteses possam ser levantadas.

Constatou-se que a adesão do revestimento ao substrato é uma característica fundamental para o desempenho de revestimentos termicamente aspergidos frente à cavitação. Infelizmente, os processos e técnicas mais poderosos neste sentido são também os mais difíceis de serem aplicados na manutenção de turbinas hidráulicas para geração de energia elétrica, devido ao tamanho dos equipamentos e/ou ao ruído gerado durante a operação.

Pesquisas de campo são difíceis de serem realizadas, em função do longo tempo de resposta, da indisponibilidade de equipamentos para isso e das implicações econômicas da utilização de equipamentos industriais nestas.

Os resultados de ensaios de cavitação acelerada, embora forneçam boas indicações da resistência dos materiais ao dano cavitacional, não podem ser transferidos diretamente para o projeto, operação ou manutenção dos equipamentos. A correlação destes com uma situação real em particular somente é obtida com o tempo.

Os revestimentos depositados por aspersão térmica a chama, embora sejam os que apresentem mais baixo desempenho, deveriam ser mais explorados como opção para a

manutenção de turbinas hidráulicas, em função de sua simplicidade e portabilidade. A princípio, um número elevado de diferentes materiais e ligas que apresentam boa resistência ao dano cavitacional poderia ser aplicado por este processo.

A utilização de técnicas estatísticas de planejamento e análise experimental é uma opção bastante indicada para situações que envolvem um grande número de variáveis e a necessidade de um número reduzido de experimentos.

Cavitação e aspersão térmica têm despertado muito interesse no campo científico e tecnológico individualmente e um pouco menos em conjunto, a nível internacional. No Brasil ambos os temas foram explorados nos últimos anos, mas aparentemente em casos esporádicos, não se identificando linhas ou grupos permanentes de pesquisa sistemática.

Além dos trabalhos de autores nacionais já citados neste capítulo, podem-se destacar ainda os trabalhos de ALCÂNTARA (1991a, b), BERGMANN (1994), KREYE (1994), LIMA (1995) e LIMA (1996). Os envolvidos nestes trabalhos são principalmente professores de universidades federais e, curiosamente, a maioria ligada à área de soldagem.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

“Qualquer ser só se mantém enquanto cumprir a contento o papel específico que lhe foi designado no imenso palco da vida.”

3.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados o procedimento experimental e os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Os resultados de medidas individuais em cada ensaio, quando é o caso, são citados no Anexo 3, para não tornar o texto muito monótono e truncado. O capítulo foi dividido em seções, de modo a facilitar principalmente a discussão dos resultados, e estas não estão, necessariamente, distribuídas na ordem exata de sua execução.

3.2 - Materiais Utilizados

O substrato usado em todos os experimentos deste trabalho foi o aço carbono ABNT 1020, cuja composição química nominal é mostrada na Tabela 3.2.I. O aço foi adquirido na forma de barras redondas, laminadas ou trefiladas, com diâmetro variando entre 15,8 ($\frac{5}{8}$ pol.) e 32 mm ($1\frac{1}{4}$ pol.). A escolha deste material se deu em função de similaridade de composição e microestrutura com boa parte dos materiais usados na fabricação de turbinas hidráulicas, além de sua disponibilidade no mercado e seu baixo custo.

Tabela 3.2.I - Composição química do aço ABNT 1020. (% peso)			
C	Mn	P (máx.)	S (máx.)
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

Nos testes iniciais foram utilizados corpos de prova cilíndricos para ensaios metalográficos, observação superficial, ensaios de rugosidade e de dureza dos revestimentos. Estes tinham em torno de 15 mm de comprimento e foram cortados diretamente de uma barra de 15,8 mm de diâmetro. Os corpos de prova para o ensaio de cavitação foram usinados a partir de uma barra de 17 mm de diâmetro, conforme desenho mostrado na figura 3.2.1, fornecido pelo fabricante do equipamento para ensaio de cavitação (TELSONIC, sem data). Os corpos de prova para o ensaio de adesão foram usinados a partir de uma barra de 30 mm de diâmetro, conforme desenho mostrado na figura 3.2.2, seguindo a especificação ASTM C-633 (1974). Os corpos de prova para o ensaio de raios-X foram cortados de uma barra de 32 mm de diâmetro, numa espessura aproximada de 15 mm, para deposição, e depois reduzida para 5,0 mm para colocação no porta-amstras.

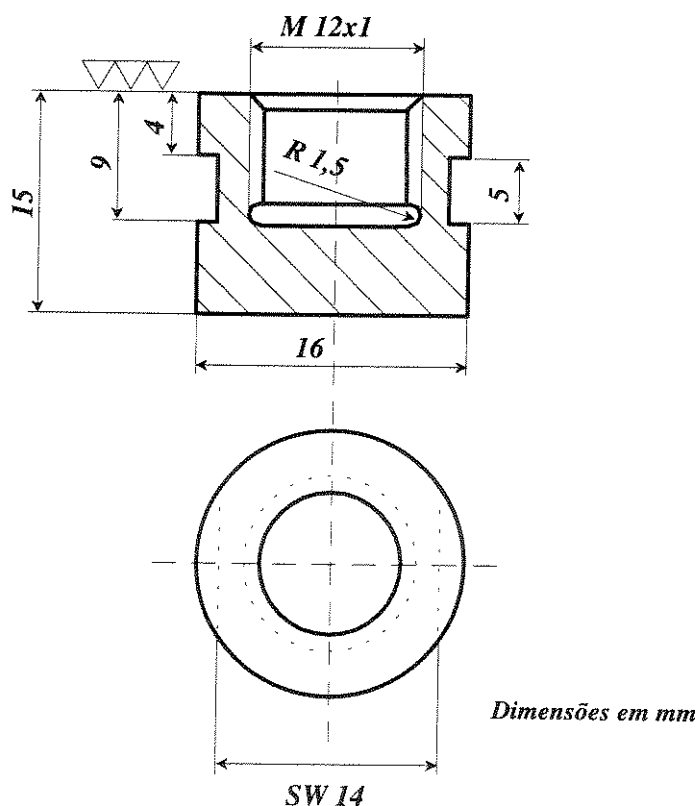


Fig. 3.2.1 - Corpo de prova para ensaio de cavitação. (TELSONIC, sem data)

Os materiais utilizados para revestimento foram arames metálicos, cordões cerâmicos e pós metálicos e cerâmicos, especialmente indicados para aspersão térmica, como mostrado na

Tabela 3.2.II. Mais informações sobre estes materiais, segundo catálogos dos fornecedores, são apresentadas no Anexo 1.

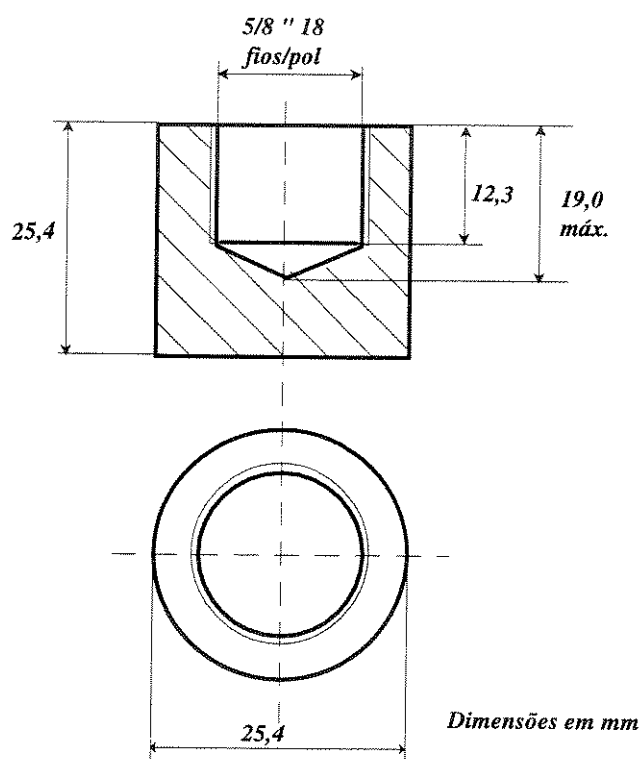


Fig. 3.2.2 - Corpo de prova para ensaio de adesão. (ASTM C-633)

Tabela 3.2.II - Materiais utilizados para revestimento.		
Material/Nome Comercial	Forma de Fornecimento	Classe/ Composição
Arame Base	Arame	Ni-Al
Metcoloy 2	Arame	Inox 420
Sprabronze AA	Arame	Bronze-Alumínio
Óxido de Cromo	Cordão	Óxido de Cromo
Metco 130 BZ	Pó	Alumina/Titânia
Metco 106	Pó	Óxido de Cromo
Metco 442	Pó	Ni-Cr-Al-Mo-B
Metco 41 C	Pó	Inox 316
Metco 12 C	Pó	Ni-Cr-B

As amostras para ensaios metalográficos foram embutidas em resina epoxi de cura a frio EPOFIX, fabricado pela Struers.

Os corpos de prova para o ensaio de adesão foram colados utilizando-se o adesivo epoxi de cura a frio (temperatura ambiente) Scotch Weld DP 460, fabricado pela 3M.

3.3 - Equipamentos Utilizados

Foram utilizados os seguintes equipamentos principais:

- Tochas para aspersão térmica - com arame: Metco 12 E
 - com pó: TeroDyn 2000 (Eutetic)
- Ensaio de Rugosidade: Mitutoyo Surf test 201 e 301
- Ensaio de Cavitação: Telsonic
- Ensaio de Dureza: Durômetro Panambra
- Ensaio de Microdureza: Microdurômetro Leitz
- Ensaio de Adesão: Máquinas de Tração Kratos e MTS
- Microscópio Eletrônica de Varredura: MEV Jeol com microsonda eletrônica
- Microscópio Ótico: Leitz
- Projetor de Perfís Mitutoyo, com micrômetro digital
- Difratorômetro de Raios X Philips
- Fotografia: Sistema Reprovit

3.4 - Desenvolvimento e Resultados dos Experimentos

3.4.1 - Introdução

Inicialmente pretendia-se depositar os revestimentos com deslocamento mecanizado da tocha e controle rigoroso dos parâmetros de operação, tais como distância e velocidade de aplicação, vazões de gás, pressão de ar comprimido, etc.

Para isto, foi montado um sistema de deslocamento linear a partir de um conjunto motor de corrente contínua/variador de velocidade acoplado a um fuso de esferas recirculantes, ao qual foi acoplada uma mesa. Esta mesa possuía um suporte para a tocha a chama, com dois eixos de movimento. Assim, era possível a aspersão mecanizada, com as peças paradas e a tocha em movimento linear controlado.

Contudo, as primeiras tentativas feitas no Laboratório de Aspersão Térmica da Unicamp não lograram bons resultados. Isto se deveu à pouca experiência dos responsáveis com o processo e a limitações e dificuldades operacionais com o equipamento e as instalações disponíveis. Por exemplo, a velocidade máxima alcançada pelo dispositivo de deslocamento mostrou-se insuficiente, a rugosidade do substrato após jateamento mostrou-se inadequada e observou-se uma flutuação excessiva da pressão na linha de ar comprimido durante a operação. Como consequência, todos os revestimentos depositados nessas condições em corpos de prova se soltaram do substrato logo no início do ensaio de cavitação, impedindo sua continuação. Estes CP's não foram mais considerados.

Por esta razão, resolveu-se trabalhar, pelo menos inicialmente, em condições mais próximas da realidade industrial, embora com algum sacrifício do rigor científico experimental. Para isto foi feito um contato com uma empresa especializada na execução de serviços de aspersão térmica a chama, que se dispôs a colaborar neste estudo.

A partir deste ponto, todos os revestimentos foram depositados em instalações e em condições industriais, com pessoal especializado, utilizando-se consumíveis e técnicas usualmente empregados na aspersão térmica a chama.

3.4.2 - *Seleção Inicial das Ligas*

Estes testes tiveram como objetivo medir algumas características dos revestimentos e selecionar ligas/revestimentos com melhor potencial para resistência ao dano cavitacional. Foram depositados revestimentos com diferentes materiais e condições, num total de 10 variações, referidas por letras minúsculas de a a j, conforme mostrado na Tabela 3.4.I. Foram

revestidos 30 corpos de prova cilíndricos, identificados por números de **1** a **30**, utilizados na realização de ensaios de dureza, dureza superficial, microdureza, rugosidade, metalográfico, exame superficial e 20 corpos de prova usinados segundo o desenho da figura 3.2.1, identificados por letras maiúsculas de **A** a **T**, usados no ensaios de cavitação.

Tabela 3.4.I - Corpos de prova usados na seleção das ligas.			
Condição	Material	Condição especial	Identificação dos CP's
a	Alumina/Titânia	--	A, B, 1, 2, 3
b	Óxido de Cromo - Pó	--	C, D, 4, 5, 6
c	Ni-Cr-Mo-Al	--	E, F, 7, 8, 9
d	Ni-Cr-Mo-Al	Sem camada base	G, H, 10, 11, 12
e	Inox 316	--	I, J, 13, 14, 15
f	Ni-Cr-B	Fundido a chama	K, L, 16, 17, 18
g	Ni-Cr-B	Não fundido	M, N, 19, 20, 21
h	Bronze-Alumínio	--	O, P, 22, 23, 24
i	Inox 420	--	Q, R, 25, 26, 27
j	Óxido de Cromo - Cordão	--	S, T, 28, 29, 30

Os revestimentos foram feitos manualmente, com parâmetros de operação normalmente usados na produção. Cada série de corpos de prova (3 cilíndricos e 2 usinados para ensaio de cavitação) era distribuída aleatoriamente numa linha de furos do gabarito de fixação mostrado na figura 3.4.1 e revestida toda de uma vez. Tentou-se depositar revestimentos com uma espessura mínima em torno de 0,3 mm (estimada como espessura mínima para o ensaio de cavitação). Para isso, o número de demãos em cada camada e o número de camadas variou para cada revestimento, como mostrado no Anexo 2, juntamente com os parâmetros de aspersão, em cada caso.

As espessuras das camadas depositadas foram medidas em projetor de perfil, com aumento de 100 vezes, em amostras metalograficamente preparadas e são mostradas na Tabela 3.4.II.

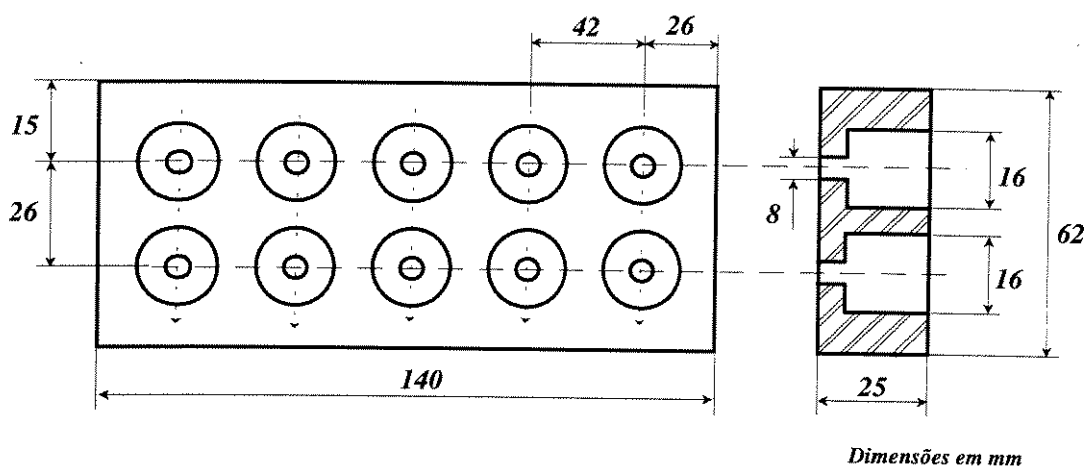


Fig. 3.4.1 - Gabarito para aspersão dos corpos de prova. (Material: aço carbono)

Tabela 3.4.II - Espessuras médias medidas das camadas depositadas (mm)		
Condição	Base	Revestimento
a	0,18	0,38
b	0,13	0,13
c	0,13	0,34
d	---	0,36
e	0,12	0,33
f	---	0,29
g	---	0,30
h	0,13	0,69
i	0,12	0,58
j	0,07	0,16

A preparação metalográfica consistiu de embutimento em resina epoxi de cura a frio, lixamento sucessivo em lixas de SiC de grana 240, 320, 400, 600 e 1000 com lubrificação a água e polimento em pasta de diamante de 9, 3 e 1 μm .

Para algumas situações (ver Anexo 2), um termopar tipo K (Cromel-Alumel) com fios de 0,1 mm de diâmetro foi soldado por descarga capacitiva na face oposta à que estava sendo revestida, tanto de corpos de prova cilíndricos quanto usinados para ensaio de cavitação. Medidas das temperaturas inicial e final na deposição de cada camada foram feitas ligando-se o termopar diretamente a um multímetro digital, com escala em $^{\circ}\text{C}$. A temperatura inicial

variou entre 50 e 75 °C e a temperatura final entre 105 e 130 °C. Não houve variação significativa das temperaturas atingidas em corpos de prova cilíndricos e usinados, apesar da variação relativamente grande de suas massas e espessuras. A temperatura do substrato durante fusão dos revestimentos tipo Ni-Cr-B atingiu um máximo da ordem de 900 °C.

As medições de rugosidade foram feitas sobre dois conjuntos de linhas aproximadamente perpendiculares entre si, como mostra a figura 3.4.2, numa tentativa de se detectar qualquer influência da direção de medição em relação à direção de deslocamento durante a aspersão. A direção inicial para medição da rugosidade em relação à direção de aspersão foi escolhida ao acaso em todos os corpos de prova.

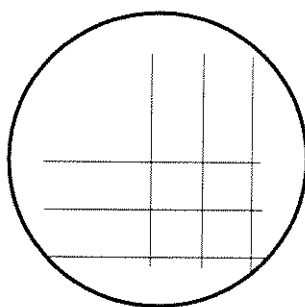


Fig. 3.4.2 - Distribuição das linhas de medida de rugosidade no CP.

Para cada material, dos três corpos cilíndricos, um foi usado para ensaios de dureza, um para exame metalográfico, medida da espessura do revestimento e ensaio de microdureza e um para ensaio de rugosidade e observação superficial. Todos os ensaios foram realizados nos corpos de prova como aspergidos. Os resultados globais destes ensaios são mostrados nas Tabelas 3.4.II e 3.4.III. Os resultados das medidas individuais em cada ensaio são mostrados no Anexo 3.

Os resultados dos ensaios de cavitação dos revestimentos obtidos são mostrados na figura 3.4.3, na forma de curvas da perda de massa acumulada e da taxa de perda de massa em função do tempo de ensaio. Um gráfico similar obtido experimentalmente para duas amostras (J1 e J2) do material do substrato (aço carbono, com a superfície na condição como preparada para aspersão, isto é, jateada com carbeto de silício) é mostrado inicialmente nesta figura. As curvas de um destes corpos de prova do aço carbono (J2) é mostrada em todos os outros

gráficos da figura, com o objetivo de servir como referência de desempenho dos materiais testados frente ao ataque cavitacional.

Tabela 3.4.III - Resultados dos ensaios de dureza Rockwell, microdureza Vickers e rugosidade.								
Condição	Dureza Superficial ⁽¹⁾		Dureza Rockwell ⁽²⁾		Microdureza Vickers ⁽³⁾		Rugosidade Ra (μm) ⁽⁴⁾	
	Média ⁽⁵⁾	D.P. ⁽⁶⁾	Média ⁽⁵⁾	D.P. ⁽⁶⁾	Média ⁽⁵⁾	D.P. ⁽⁶⁾	Média ⁽⁷⁾	D.P. ⁽⁶⁾
a	87,3	2,89	65,6	7,18	798	50	10,87	1,13
b	61,2	10,60	46,6	6,47	435	44	10,33	0,99
c	70,0	6,75	54,5	5,06	110	30	17,00	1,24
d	70,7	3,21	64,7	3,93	450	10	21,71	1,29
e	51,8	5,13	60,6	6,52	498	100	22,36	1,72
f	76,3	1,15	65,4	3,19	524	44	6,08	1,09
g	71,9	5,07	66,3	8,43	532	77	19,27	1,76
h	59,8	6,80	47,4	3,06	181	12	13,51	1,45
i	73,4	1,60	67,4	3,64	380	70	17,06	1,58
j	74,0	14,23	65,4	2,42	671	113	10,85	0,59

(1) - Penetrador cônico de diamante, carga de 15 kg, de acordo com a norma ASTM E-18
 (2) - Penetrador cônico de diamante, carga de 62,5 kg, de acordo com a norma ASTM E-18
 (3) - Penetrador piramidal de diamante, carga de 500 g, de acordo com a norma ASTM E-384
 (4) - De acordo com a norma ABNT NBR 6405/88. Linhas de medição distribuídas conforme figura 3.4.2.
 (5) - De cinco medidas.
 (6) - Desvio Padrão.
 (7) - De seis medidas.

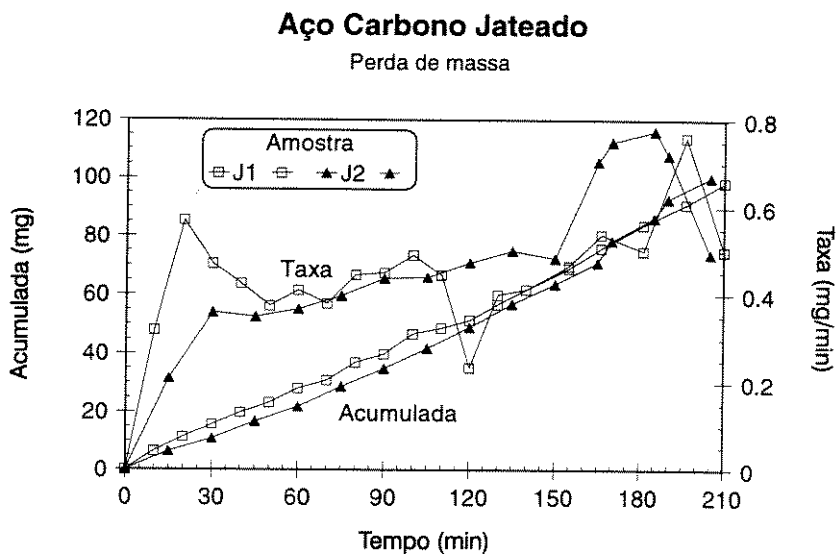
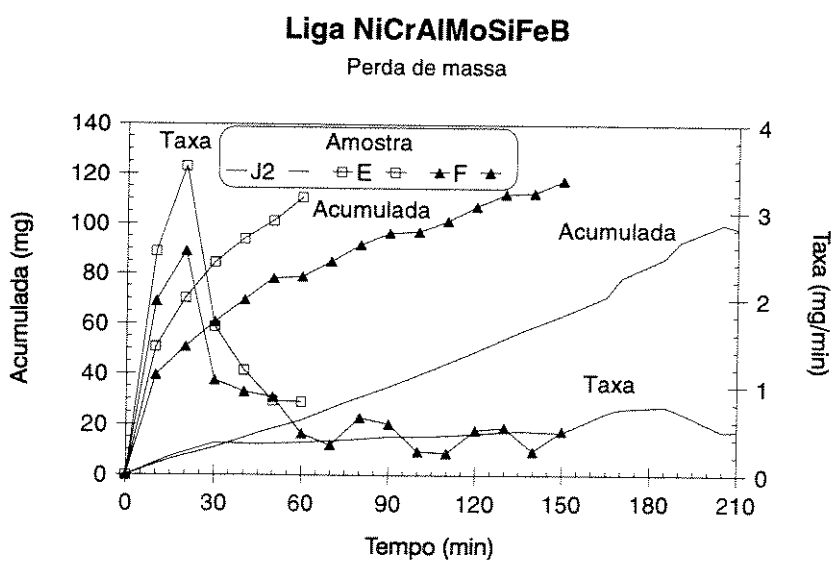
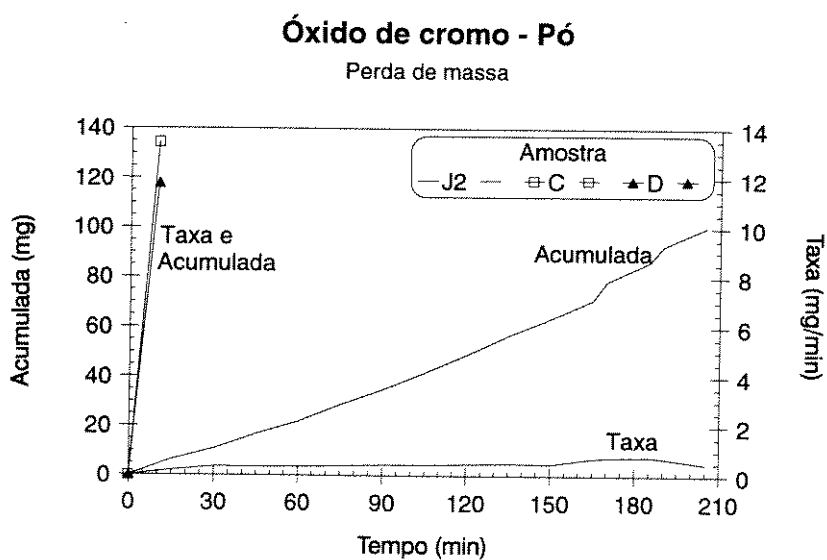
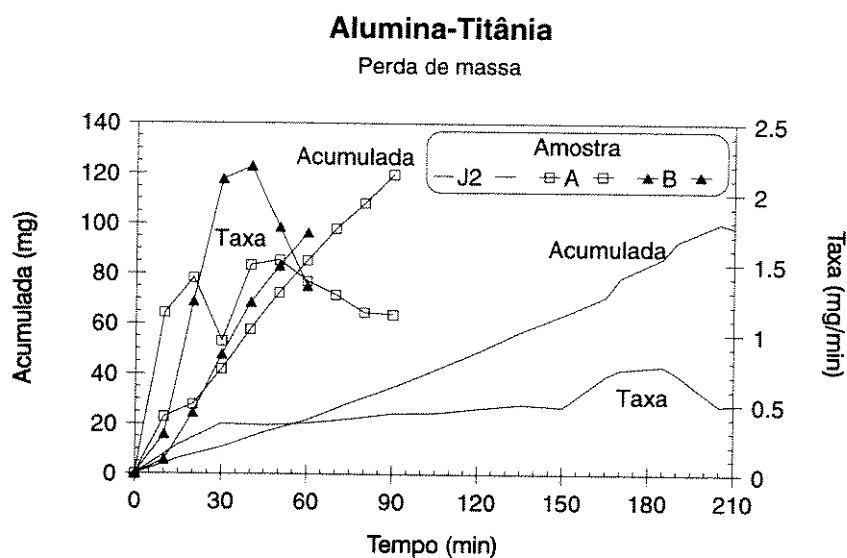
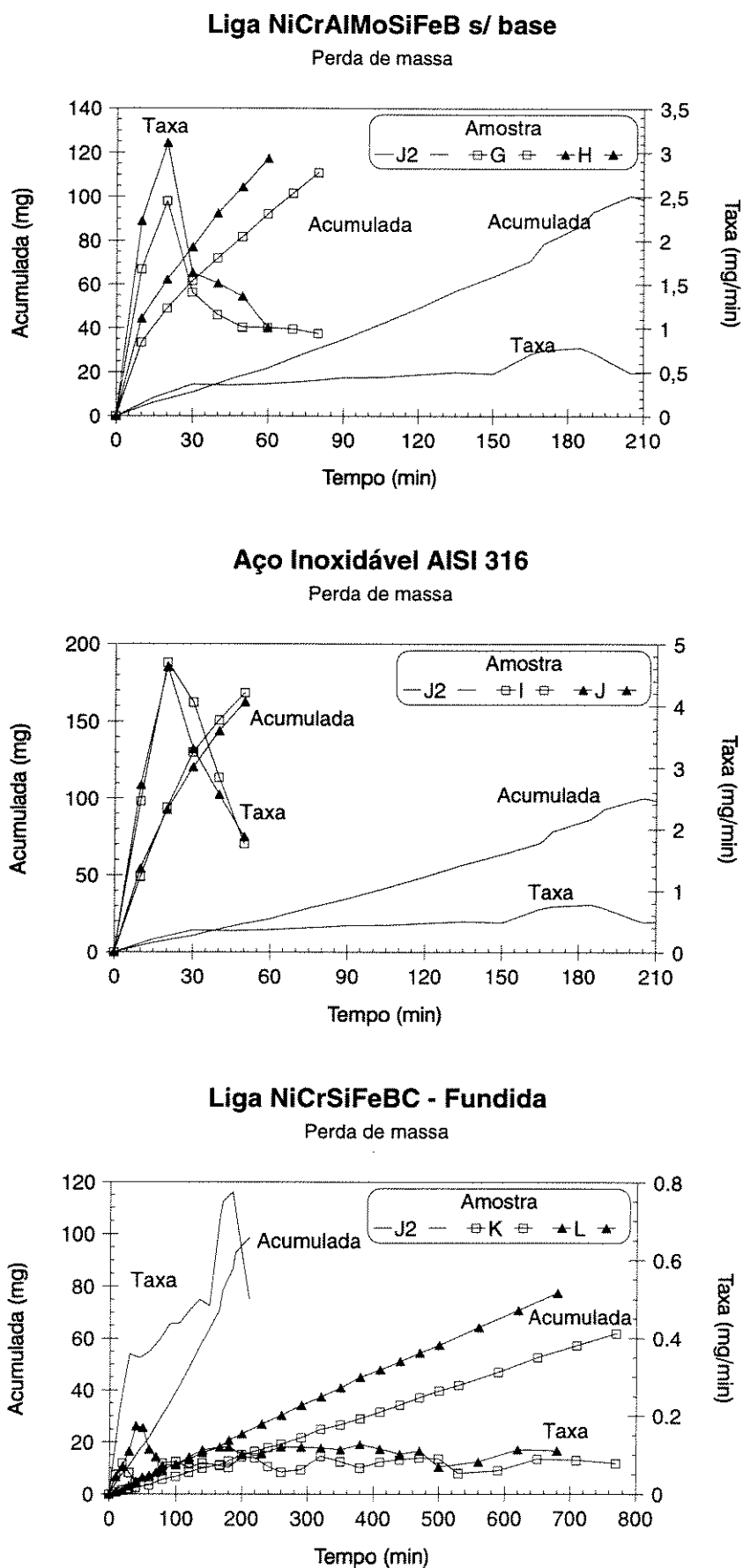


Fig. 3.4.3 - Resultados dos ensaios de cavitação desta etapa. (continua...)



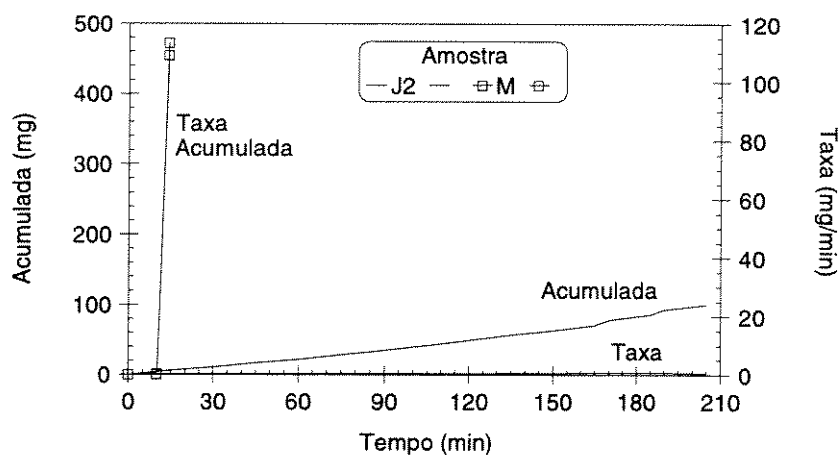
(...continuação) Fig. 3.4.3 - Resultados dos ensaios de cavitação desta etapa. (continua...)



(...continuação) Fig. 3.4.3 - Resultados dos ensaios de cavitação desta etapa. (continua...)

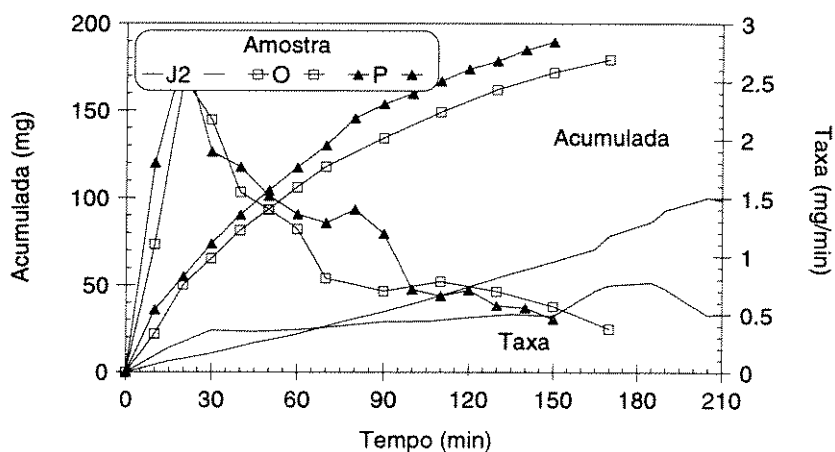
Liga NiCrSiFeBC - Sem fundir

Perda de massa



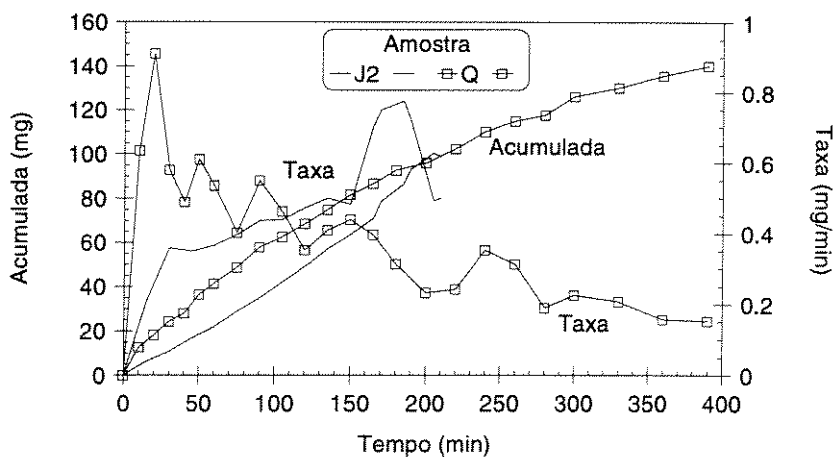
Bronze-Alumínio

Perda de massa

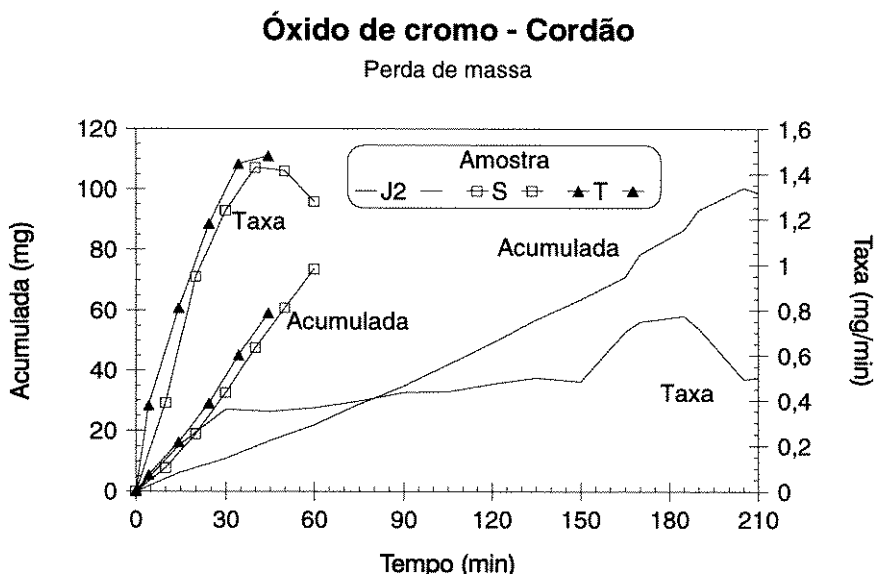


Aço Inoxidável AISI 420

Perda de massa



(...continuação) Fig. 3.4.3 - Resultados dos ensaios de cavitação desta etapa. (continua...)



(...continuação) Fig. 3.4.3 - Resultados dos ensaios de cavitação desta etapa.

Deve-se observar que foi constatada uma melhora grande na adesão ao substrato dos revestimentos depositados na indústria, em relação aos depositados na Unicamp, já que não ocorreu mais o desprendimento do revestimento, que impedia a realização do ensaio de cavitação.

Como se observa na figura, para quase todos os materiais ocorreu uma perda de massa elevada em tempos de ensaio relativamente pequenos, maior mesmo que as perdas observadas para corpos de prova de aço carbono. Somente o revestimento de aço inoxidável AISI 420 apresentou desempenho similar ao do metal do substrato e o revestimento fundido foi mais resistente que este. Isto sugere que revestimentos aspergidos termicamente a chama não são adequados para resistência ao ataque cavitacional. Deve-se lembrar aqui que todas as ligas testadas são indicadas pelo fabricante para esta aplicação.

Com estes resultados duas questões importantes foram colocadas: (1) o procedimento de aspersão estava inadequado e resultando em revestimentos com baixo desempenho? e (2) seria este baixo desempenho devido à estrutura resultante do processo de aspersão com chama? Assim, resolveu-se aprofundar estas questões nas etapas seguintes.

3.4.3 - Variação nos Parâmetros de Aspersão

Os resultados da etapa anterior sugeriam uma pequena coesão entre as lamelas, independentemente da causa, já que revestimentos de materiais considerados resistentes ao dano cavitacional apresentaram desempenho inferior ao do próprio aço carbono.

Para se esclarecer a primeira questão, foram confeccionados 2 conjuntos de corpos de prova, um aspergido com bronze-alumínio e outro com aço inoxidável martensítico AISI 420, mas mudando-se os parâmetros de operação, numa tentativa de melhorar a coesão entre as partículas do revestimento.

Foram aumentadas a vazão de gases e a pressão de ar comprimido, individualmente e em conjunto. Estes CP's, foram identificados por duas letras, a primeira indicando o material aspergido (A para aço o inoxidável e B para o bronze-alumínio) e a segunda o parâmetro variado (N nenhum, G a vazão de gases, A a pressão de ar comprimido e T ambos). Estes conjuntos, similares aos da etapa anterior, também foram ensaiados como naquela etapa.

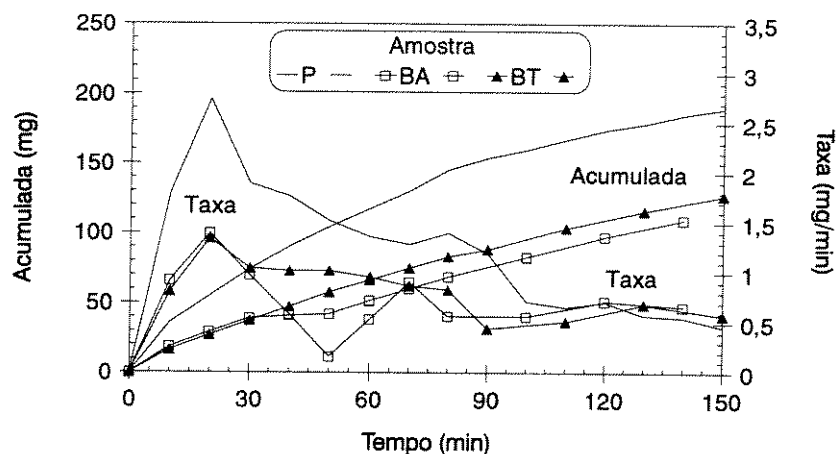
Foram também confeccionados e ensaiados corpos de prova para ensaio de adesão, conforme a norma ASTM C-633/74 (figura 3.2.2), para ambos os materiais, com os mesmos conjuntos de parâmetros operacionais (ver Anexo 2). Os resultados destes ensaios são mostrados nas tabelas 3.4.IV e 3.4.V e figura 3.4.4. A figura 3.4.5 mostra uma superfície típica (CP AT) de um corpo de prova após o ensaio de adesão.

Tabela 3.4.IV - Resultados dos ensaios de dureza e rugosidade						
C. P.	Dureza Rockwell C		Dureza Superficial Rockwell C		Rugosidade ISO Ra (μm)	
	Média	D. P.	Média	D. P.	Média	D.P.
AN	25,8	6,3	60,5	6,32	18,38	2,60
AA	32,4	7,17	74,5	4,20	16,95	3,24
AG	23,2	2,59	69,5	2,52	17,26	2,69
AT	28,8	7,26	68,5	5,57	18,22	3,80
BN	--	--	60,5	5,80	19,56	2,33
BA	--	--	65,2	5,40	16,19	1,29
BG	--	--	65,2	6,95	16,73	2,46
BT	--	--	62,0	8,75	14,73	1,81

Tabela 3.4.V - Resultados do ensaio de adesão (tração)		
CP	Tensão de Ruptura (MPa)	Local de Ruptura
AN	21,3	Através do Revestimento
AA	23,3	Através do Revestimento
AG	24,6	Através do Revestimento
AT	22,9	Através do Revestimento
BN	9,2	Através do Revestimento
BA	9,1	Através do Revestimento
BG	9,7	Através do Revestimento
BT	11,9	Através do Revestimento

Bronze-Alumínio

Perda de massa



Aço Inoxidável AISI 420

Perda de massa

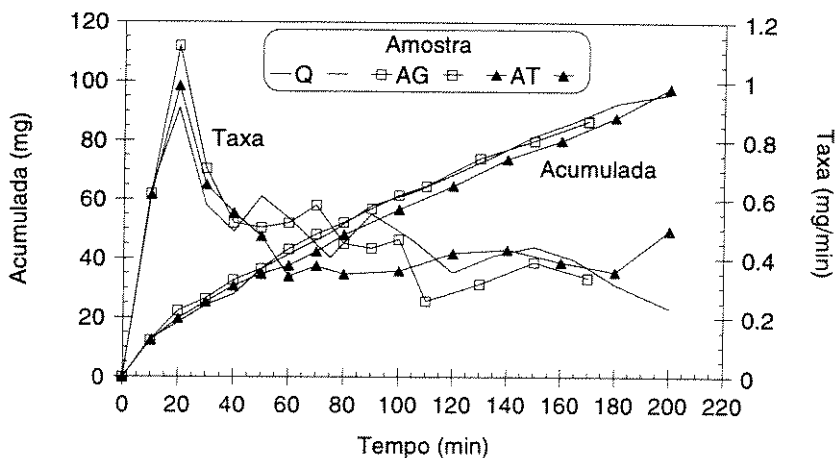


Fig. 3.4.4 - Resultados do ensaio de cavitação.

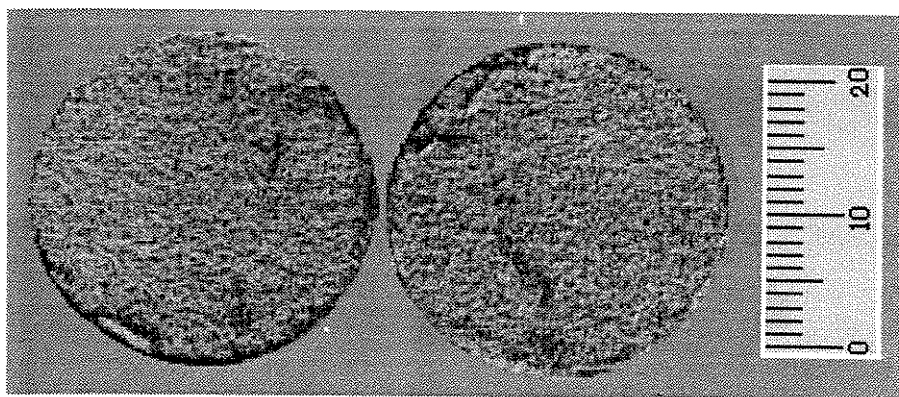


Fig. 3.4.5 - Superfície do CP após ensaio de adesão.

Para o aço inoxidável, a modificação dos parâmetros de aspersão praticamente não influenciou o desempenho no ensaio de cavitação. Já para o bronze-alumínio houve um ganho de desempenho, já que a perda de massa dos CP's com parâmetros de deposição modificados foi menor que a dos CP's anteriores. Contudo, em ambos os casos, a perda de massa dos revestimentos aspergidos a chama não apresentou queda significativa (ou seja, melhoria de desempenho) em relação ao material do substrato.

3.4.4 - Teste de Revestimento Aspergido de Aço Carbono

Dois corpos de prova foram revestidos com aço baixo carbono, de composição química similar à do substrato, e ensaiados à cavitação. O resultado destes ensaios é mostrado na figura 3.4.6 (curvas AC1 e AC2), juntamente com uma curva obtida para o aço carbono trefilado (J2).

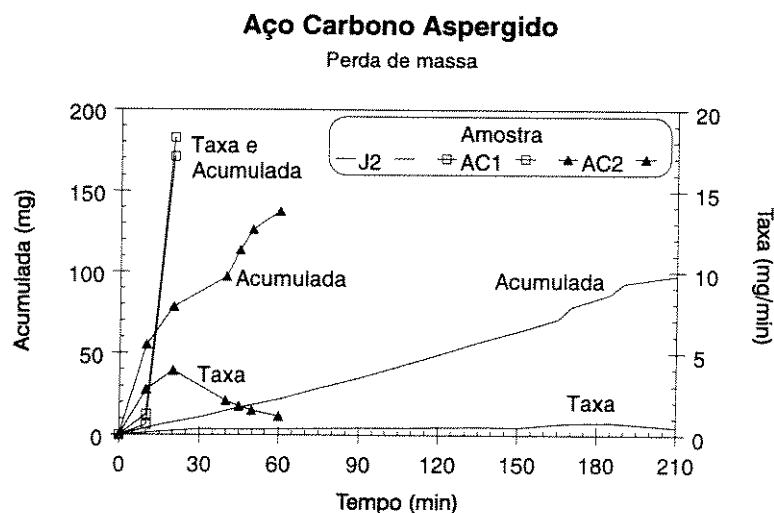


Fig. 3.4.6 - Resultado do ensaio de cavitação do revestimento de aço carbono.

Novamente os resultados sugerem que a estrutura lamelar típica do revestimento por aspersão térmica é a responsável pela baixa resistência dos revestimentos ao dano cavitacional, já que a perda de massa dos revestimentos aspergidos (AC1 e AC2) foi muito mais rápida que a do mesmo material trefilado, com a superfície jateada (J2).

3.4.5 - Estrutura dos Revestimentos e Mecanismos de Perda de Massa

Os resultados anteriores mostraram que o baixo desempenho dos revestimentos quanto à resistência ao dano cavitacional observado nas etapas anteriores era devido principalmente à estrutura resultante do processo de aspersão térmica à chama. Resolveu-se então estudar com mais detalhes este aspecto.

Observou-se as superfícies dos corpos de prova da etapa 3.4.2 antes e principalmente depois do ensaio de cavitação, numa tentativa de se identificar o(s) mecanismo(s) de ruptura dos revestimentos. Dependendo do desempenho do material, a superfície mostrava uma aparência de desgaste associado com o arrancamento de material por fratura frágil, sem deformação, ou deformada plasticamente, indicando arrancamento associado com fratura dúctil. As figuras 3.4.7 e 3.4.8 mostram a superfície dos corpos de prova B (alumina-titânia) e K (liga Ni-Cr-B, fundida a chama pós-aspersão), típicas das tendências observadas, após o ensaio de cavitação, como observadas na lupa e no MEV, respectivamente.

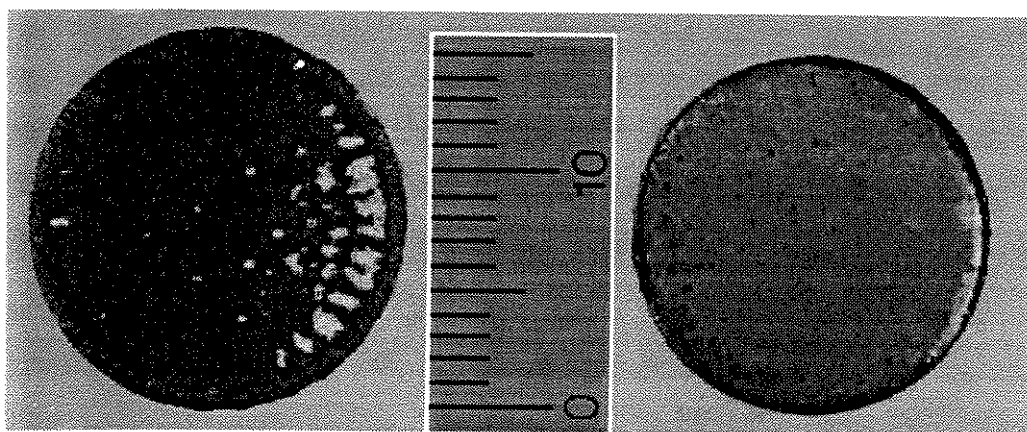


Fig. 3.4.7 - Superfície dos CP's B e K após 60 e 770 minutos de ensaio, respectivamente. Lupa.

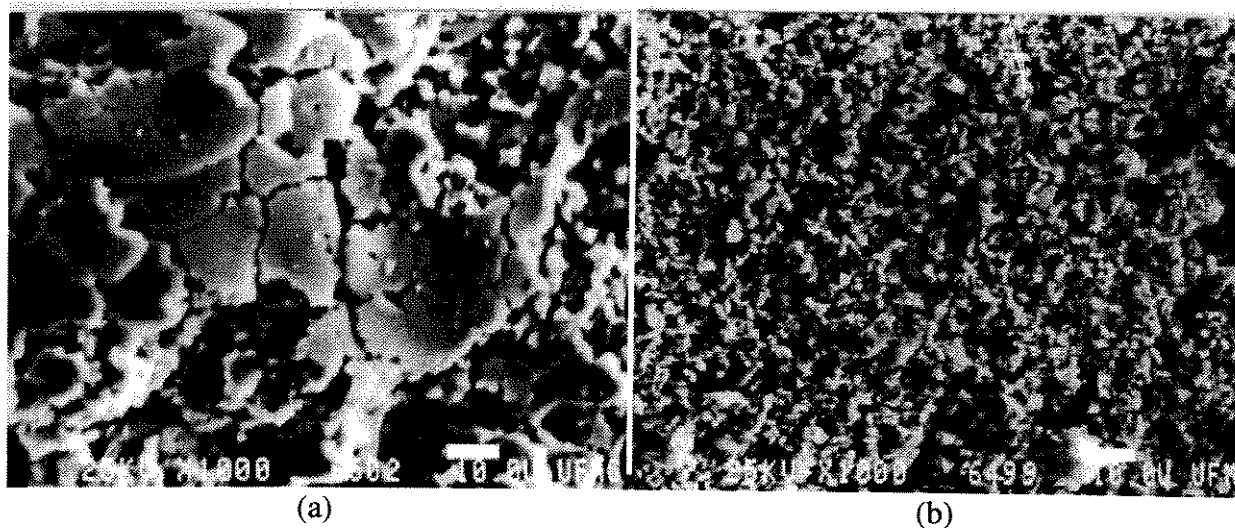


Fig. 3.4.8 - Superfície dos CP's B e K após 60 e 770 minutos de ensaio, respectivamente. MEV.

Também o material arrancado de alguns corpos de prova durante o ensaio de cavitação foi recolhido, preparado por filtragem e secagem e observado ao microscópio eletrônico de varredura, na tentativa de se identificar o processo de falha do revestimento. A figura 3.4.9 mostra estes resíduos obtidos no ensaio de cavitação dos corpos de prova mostrados nas figuras anteriores.

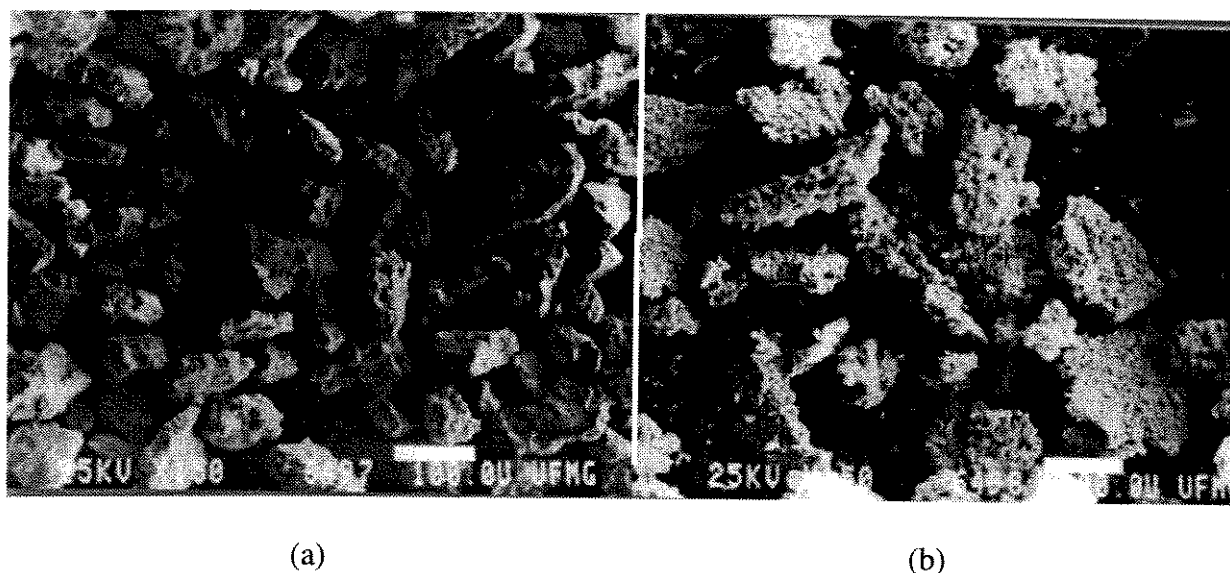


Fig. 3.4.9 - Material arrancado dos CP's B e K. Tempos de ensaio 60 e 770 min. MEV.

Pode-se observar partículas aproximadamente do mesmo tamanho para ambos os materiais, com aparência superficial similar às superfícies dos corpos de prova respectivos, o

que concorda apenas parcialmente com o conjunto dos resultados anteriores. O tamanho similar destas partículas de resíduo não era esperado, em função das diferenças nas taxas de perda de massa observadas para os diferentes materiais.

Esta discrepância poderia ter sido causada pela quebra das partículas de revestimento após desprenderem-se do substrato, pela técnica de preparação do resíduo recolhido para observação ou por características do ensaio de cavitação, tais como frequência e amplitude da vibração, aspectos geométricos do ensaio, entre outras. Resolveu-se então testar estas hipóteses como descrito nas próximas seções.

3.4.6 - Teste com um Disco de Revestimento

Um disco de revestimento da liga Ni-Cr-B que havia se soltado do substrato na etapa de seleção das ligas, na condição como aspergido (CP N da tabela 3.4.I), que apresentou bom desempenho no ensaio de cavitação somente quando fundido, foi colocado dentro de um recipiente de vidro totalmente cheio de água destilada (como a usada nos testes anteriores). Este recipiente foi tampado com uma membrana plástica extremamente flexível e colocado dentro do recipiente onde se realizavam os testes de cavitação, lá permanecendo por várias horas, sob vibração, enquanto outros CP's eram ensaiados.

A figura 3.4.10 mostra que já havia ocorrido uma perfuração no centro do revestimento como consequência do ataque no início do ensaio de cavitação anterior, pouco antes dele se soltar do substrato, e que a maior parte da superfície não foi erodida, apresentando uma superfície típica da condição como aspergida. A formação desta perfuração no centro do revestimento ocorreu em outros corpos de prova com revestimentos pouco resistentes e parece ser um efeito da geometria do ensaio (ver Anexo 3).

Após várias horas sob vibração ultra-sônica, não se observou nenhuma alteração superficial como quebra ou mesmo arrancamento de material do disco. Portanto, a hipótese de fratura e refino das partículas após serem arrancadas do CP foi afastada e uma outra explicação para o tamanho similar das partículas teria de ser dada. Suspeitou-se então que a

técnica de preparação do resíduo para observação poderia estar influenciando o resultado e esta foi investigada na etapa seguinte.

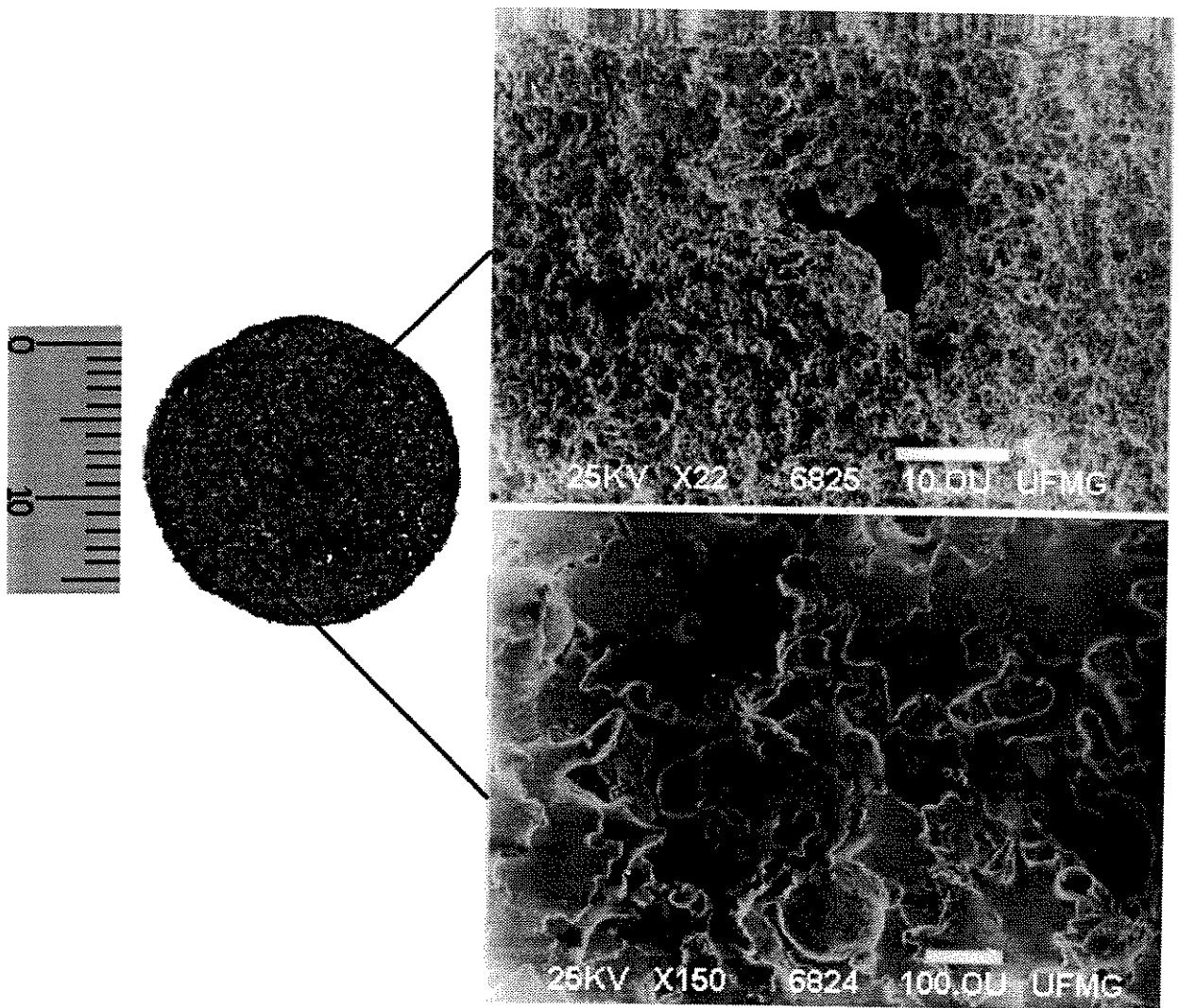


Fig. 3.4.10 - Superfície do disco do revestimento do CP N após imersão.

3.4.7 - *Influência da Técnica de Preparação dos Resíduos*

O resíduo do ensaio de cavitação observado anteriormente indicou que a técnica de preparação deste para exame ao microscópio poderia estar influenciando a aparência e tamanho das partículas, já que um resultado inesperado foi obtido, isto é, os resíduos recolhidos no ensaio de materiais pouco e muito resistentes ao dano cavitacional foram muito semelhantes.

O resíduo resultante do ensaio de cavitação do CP L (revestimento fundido, condição f da tabela 3.4.I) foi preparado de uma maneira diferente, por centrifugação. O exame ao MEV mostrou, como esperado inicialmente, partículas muito mais finas, cerca de 10 vezes menores que as observadas inicialmente, como pode ser visto na figura 3.4.11. Este resultado foi uma indicação bastante evidente de que a técnica de preparo do resíduo para observação ao MEV influencia fortemente o tamanho das partículas observadas.

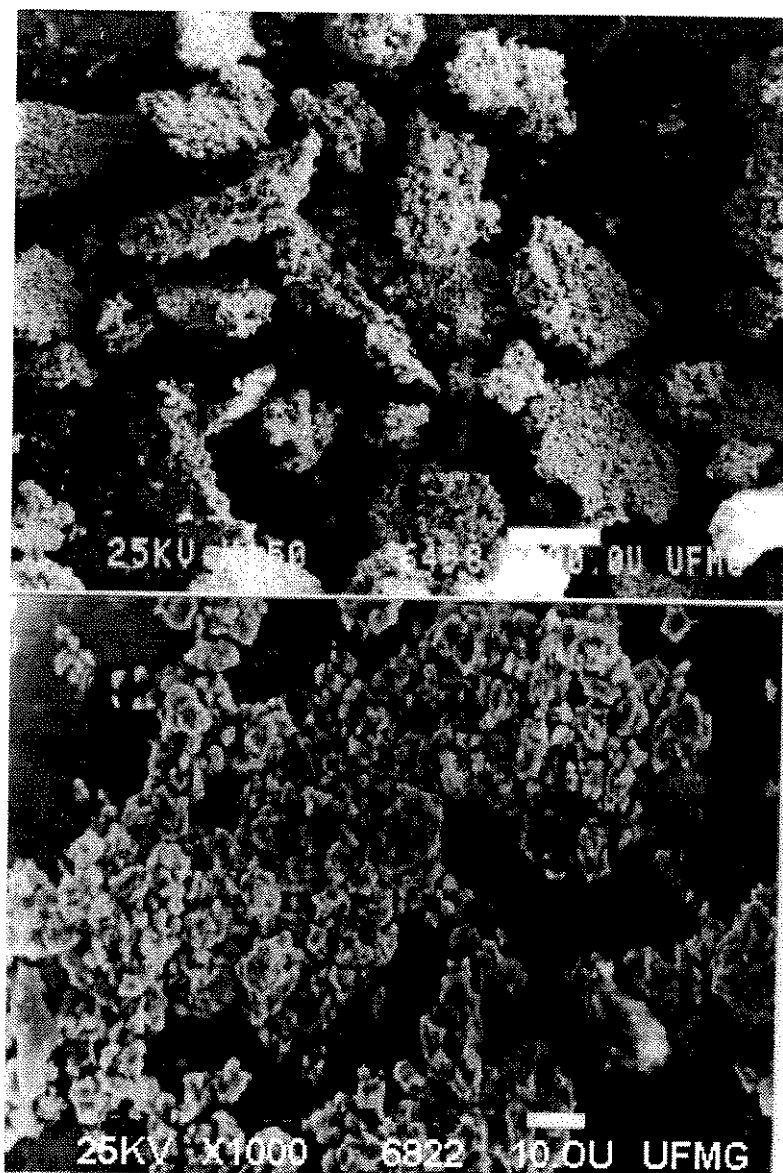


Fig. 3.4.11 - Resíduos do ensaio de cavitação do revestimento fundido preparados por filtragem e centrifugação, respectivamente, para observação. MEV. (Observe-se que o aumento é diferente em cada foto).

Para se confirmar a influência da técnica de preparo do resíduo do ensaio para observação, resolveu-se realizar um teste específico, usando-se um só corpo de prova (de aço

carbono trefilado, por simplicidade), cujo resíduo foi preparado pelas duas técnicas usadas anteriormente, conforme descrito a seguir.

Um CP de aço carbono trefilado, com superfície jateada, foi submetido ao ensaio de cavitação em intervalos sucessivos de 10 minutos. Em cada intervalo, o CP era imerso alternadamente em dois recipientes idênticos, contendo 1000 ml de água destilada, como os usados em todos os outros ensaios de cavitação. Os resíduos obtidos nestes dois recipientes foram preparados utilizando-se as duas técnicas, num mesmo dia, e observados ao MEV no dia seguinte. Neste intervalo, os resíduos ficaram guardados em recipiente tampado em ambiente seco e com temperatura ligeiramente acima da ambiente.

Na primeira técnica, usada nas etapas anteriores deste trabalho, o resíduo foi filtrado em papel filtro especial, com o auxílio de uma bomba de vácuo, e secado em estufa a uma temperatura de cerca de 400 °C, por 30 minutos e depois o papel filtro foi queimado. Segundo o fabricante, o resíduo deste após a queima tem massa inferior a 0,1 mg.

Na outra, também já usada no CP L (tabela 3.4.I), como dito anteriormente, a água destilada utilizada no ensaio foi centrifugada, concentrando-se o resíduo em volumes de líquido sucessivamente menores. Quando o volume alcançou valores inferiores a 50 ml, foi adicionado álcool à mistura e o processo continuado até que o resíduo ficou imerso praticamente em álcool puro, que foi finalmente deixado evaporar em estufa, por uma hora, à temperatura de 100 °C. Desta forma, o material recolhido não foi submetido a temperaturas tão elevadas quanto no processo anterior.

Os resíduos preparados por estas duas técnicas, como observados ao MEV, são mostrados na figura 3.4.12. Note-se que os aumentos nas fotos são também diferentes. Com este resultado pode-se confirmar que a técnica de preparação do resíduo para observação ao MEV influencia fortemente o tamanho da partícula observada.

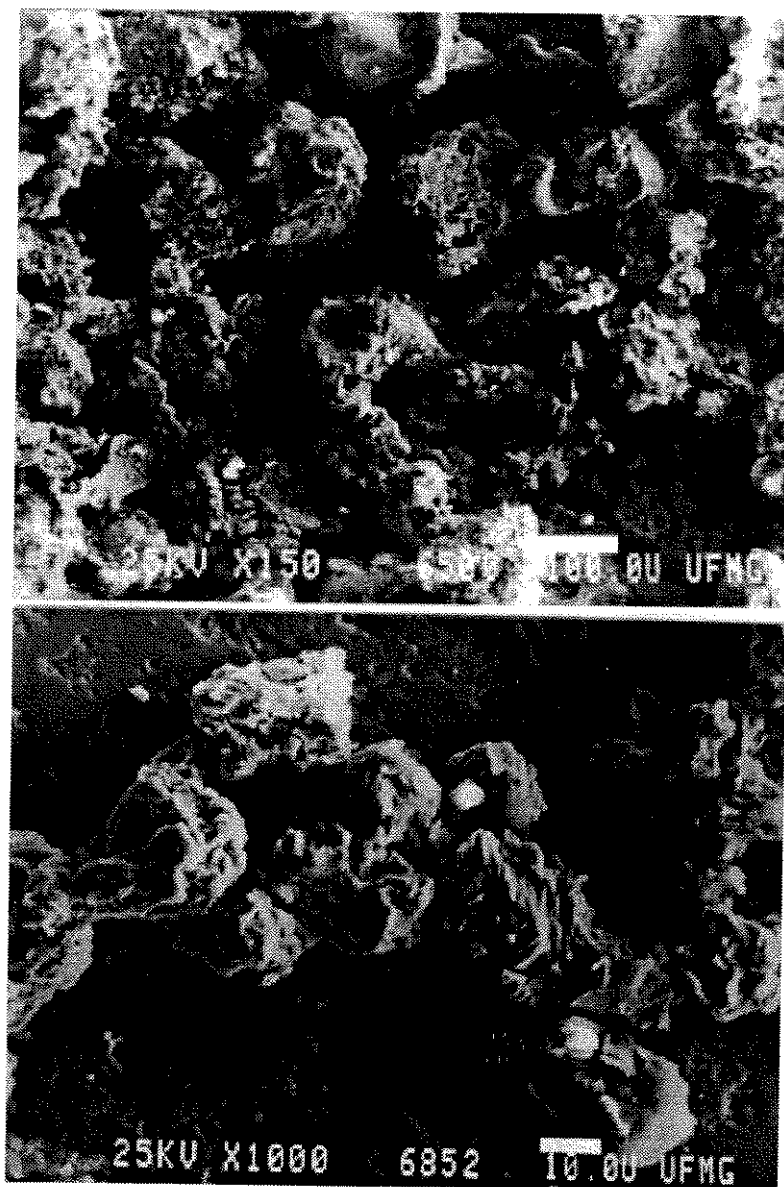


Fig. 3.4.12 - Resíduos de aço carbono obtidos por diferentes técnicas de preparo: por filtragem e por centrifugação, respectivamente.

3.4.8 - *Influência das Características Superficiais na Resistência à Cavitação*

Corpos de prova de aço carbono trefilado sem revestimento e com diferentes acabamentos superficiais foram preparados para se avaliar o efeito da rugosidade superficial no ensaio de cavitação. Dois foram lixados e polidos metalograficamente, de forma a reduzir a rugosidade inicial, e um foi avaliado na condição como usinado em torno mecânico. Estes CP's foram avaliados quanto à rugosidade e resistência à cavitação e os resultados são mostrados na Tabela 3.4.VI e na figura 2.4.I, juntamente com o de CP's jateados com carbetto

de alumínio (condição como preparado para aspersão), já usados como referência na seleção inicial das ligas (J1 e J2).

Tabela 3.4.VI - Rugosidade dos CP's	
Condição Superficial do CP	Rugosidade Ra ("cutoff" 2,5 e [0,8] mm) (μm)
Polido	$0,10 \pm 0,02$ [$0,05 \pm 0$]
Usinado	$5,45 \pm 0,39$ [$3,30 \pm 0,21$]
Jateado	$7,53 \pm 0,46$ [$9,08 \pm 0,76$]

Aço Carbono ABNT 1020

Perda de massa

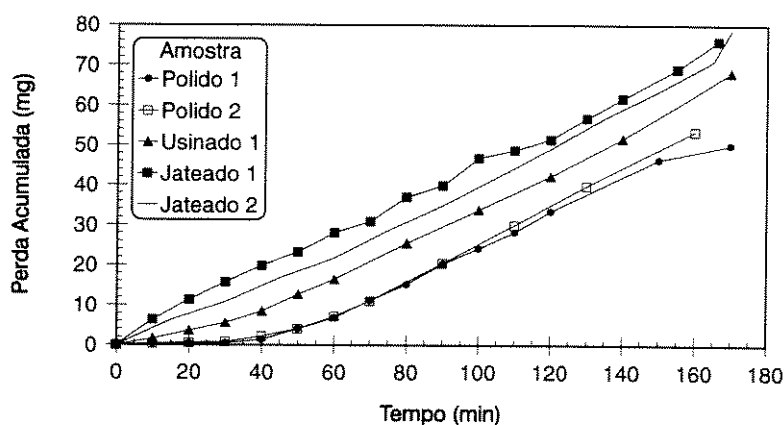


Fig. 3.4.13 - Resultado do ensaio de cavitação em CP's com superfície jateada, polida e usinada.

Pode-se ver que a condição superficial inicial do corpo de prova influencia seu desempenho no ensaio de cavitação. As taxas de perda de massa são aproximadamente constantes (inclinação das curvas), mas a perda no início do ensaio (tempo de incubação) tende a ser menor à medida que a rugosidade diminui.

3.4.9 - Utilização do Revestimento Fundido

Os resultados obtidos até este ponto mostraram claramente que, dos revestimentos depositados por aspersão térmica a chama, apenas os fundidos após aplicação têm boa resistência ao ataque cavitacional. Entretanto, em função do tamanho e espessura das partes

das turbinas hidráulicas que necessitam de proteção contra este tipo de desgaste, a fusão com chama é totalmente inviável, devido à baixa eficiência térmica desta fonte de calor. Assim, decidiu-se tentar a fusão com um arco elétrico, utilizando-se o processo TIG (que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e proteção com gás inerte).

Foram preparados dois conjuntos de corpos de prova aspergidos por chama para ensaios de cavitação, tração (adesão), dureza, metalografia e difração de raios-X, utilizando-se o mesmo pó e as mesmas condições usadas nas etapas anteriores. A fusão dos revestimentos foi feita com chama, como na etapa anterior, num conjunto, e no outro com uma tocha TIG, eletrodo negativo com diâmetro de 1,2 mm, proteção de argônio a uma vazão de 10 l/min, comprimento de arco da ordem de 2 mm e corrente entre 40 e 60A, dependendo do tipo do CP (tração, difração de raios-X, dureza ou cavitação).

A figura 3.4.14 mostra o resultado do ensaio de cavitação dos revestimentos fundidos com TIG (TIG1 e TIG2) e de um dos revestimentos da primeira etapa, fundido com chama (CHAMA), para comparação. Pode-se notar que o desempenho é muito semelhante, observando-se que as curvas de perda de massa acumulada são praticamente superpostas.

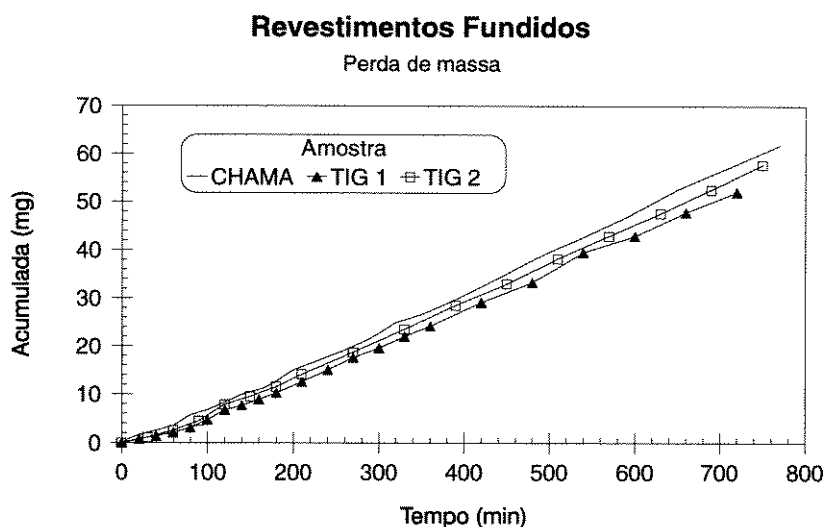


Fig. 3.4.14 - Desempenho dos revestimentos fundidos com TIG no ensaio de cavitação.

Pode-se observar que o desempenho dos revestimentos fundidos com TIG e com chama é similar, com pequena vantagem para os revestimentos fundidos a arco.

3.4.10 - Caracterização Microestrutural

Foi feita uma caracterização estrutural mais detalhada dos revestimentos fundidos, que se mostraram de interesse na proteção de turbinas hidráulicas, procurando-se associar características estruturais dos revestimentos ao seu desempenho quanto à cavitação e à evolução da microestrutura nas diferentes etapas do processo de recobrimento. Foram preparados, nas mesmas condições citadas anteriormente, corpos de prova para ensaio de dureza, adesão (tração), metalografia e espectometria de raios-X, com revestimentos fundidos com chama e com arco TIG.

A Tabela 3.4.VII apresenta os resultados de medidas de espessura, dureza e a aderência ao substrato dos mesmos.

Tabela 3.4.VII- Espessura, dureza e aderência dos revestimentos desta etapa.		
Característica	Fundido com chama	Fundido com arco
Espessura média (mm)	$0,37 \pm 0,04$	$0,47 \pm 0,05$
Dureza HRc (medida direta)	$24,7 \pm 1,63$	$36,2 \pm 3,31$
Microdureza Vickers 500g	$491,5 \pm 29,5$	$497,6 \pm 63,4$
Aderência ou Coesão (MPa)*	$> 31,27 \pm 1,31$	$> 33,53 \pm 3,48$

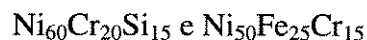
* Em ambos, o rompimento dos CP's ocorreu através da camada de adesivo.

Foi feita uma análise química por emissão de energia dispersiva de raios-X (EDS) e a caracterização das fases estruturais presentes no pó utilizado para aspersão do revestimento fundido, no revestimento como aspergido, no revestimento fundido com chama e no revestimento fundido com arco, utilizando-se difração de raios-X. O resultado é mostrado nas tabelas 3.4.VIII e 3.4.IX e na figura 3.4.15. Os resultados individuais da microanálise são mostrados no Anexo 3.

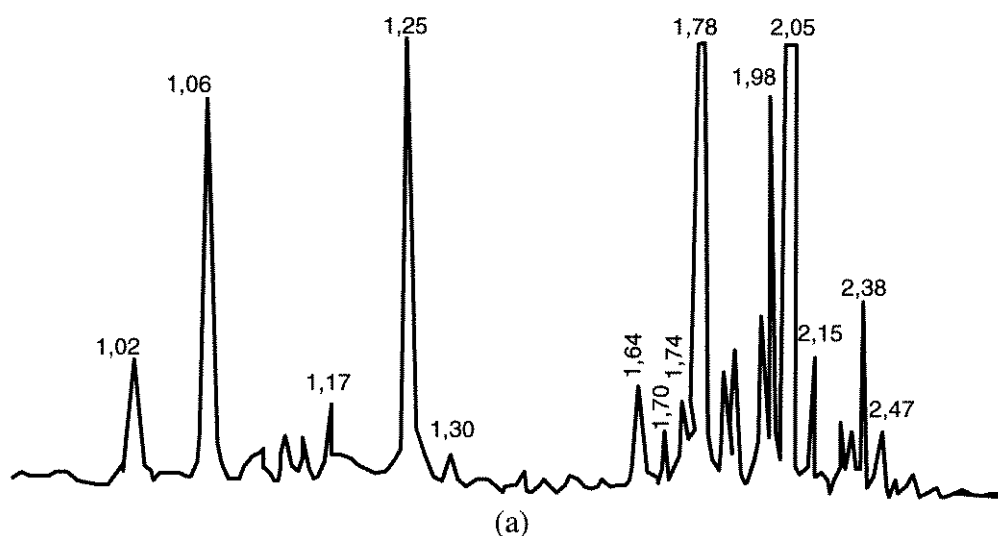
Tabela 3.4.VIII - Composição química média determinada (% peso)				
Elemento	Pó	Como Aspergido	Fundido a chama	Fundido a arco
Ni	80,0	79,5	80,5	62,0
Cr	13,0	14,5	12,0	10,0
Si	4,5	4,5	4,5	3,5
Fe	2,2	2,5	3,0	24,5

Tabela 3.4.IX - Fases microestruturais identificadas	
Amostra	Fases presentes
Pó	Níquel metálico Solução sólida CFC Solução sólida ou intermetálico com Ni Cr Fe e Si*
Como aspergida	Solução sólida CFC
Fundida a chama	Níquel metálico Solução sólida CFC Solução sólida Ni Fe e Cr*
Fundida a arco	Solução sólida CFC Solução sólida Ni Fe (Cr)*

* Concentração aproximada (% atômica):

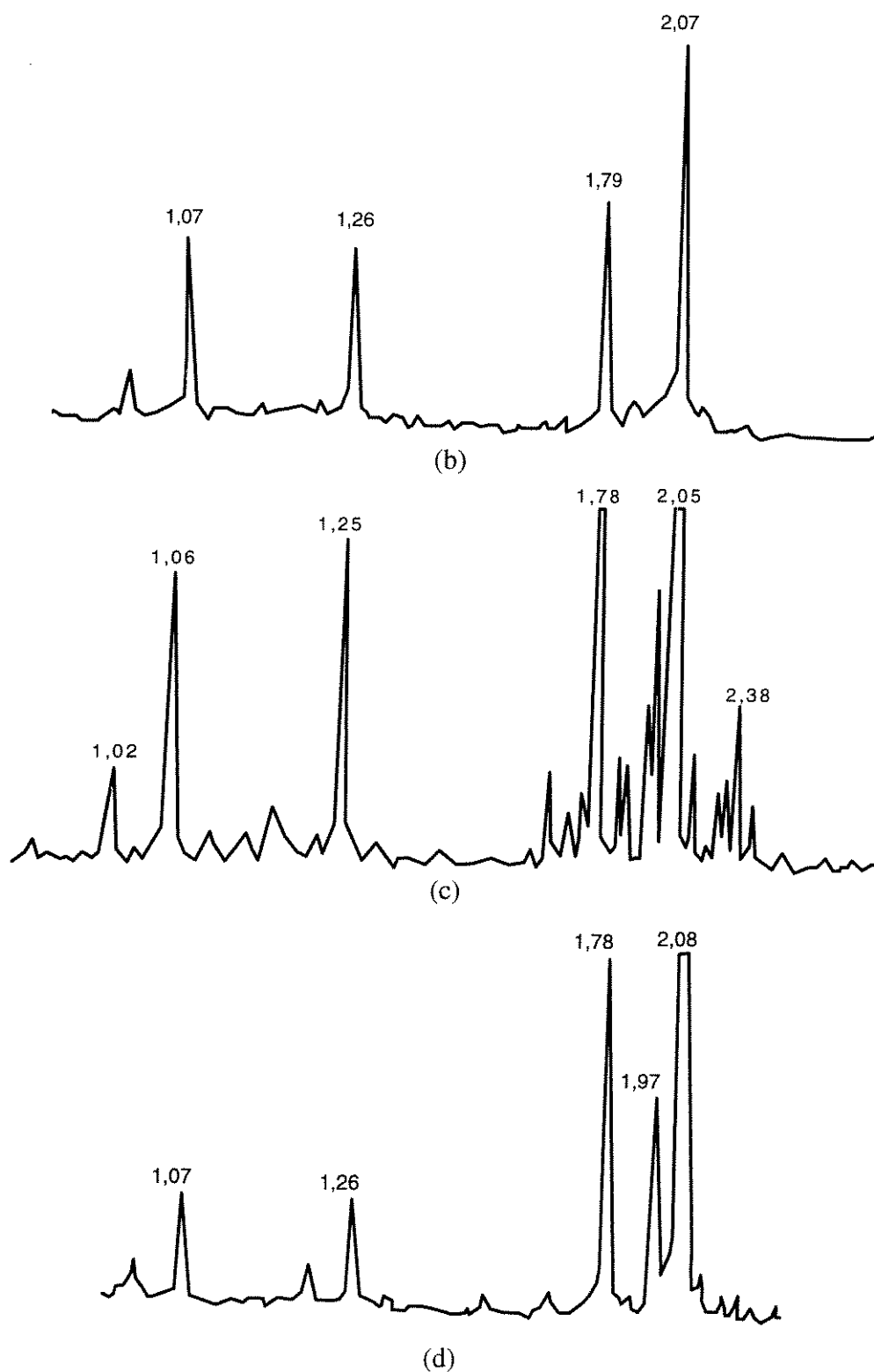


Pode-se notar que a estrutura e composição química em todos os casos é similar, embora algumas discrepâncias possam ser ressaltadas. Estas serão discutidas mais profundamente no próximo capítulo.



(Os números indicam as distâncias interplanares d , em ângstrons)

Fig. 3.4.15 - Difratogramas obtidos. (a) pó, (b) como aspergido, (c) fundido com chama e (d) fundido a arco. (continua...)



(Os números indicam as distâncias interplanares d , em ângstrons)

(...continuação) Fig. 3.4.15 - Difrátogramas obtidos. (a) pó, (b) como aspergido, (c) fundido com chama e (d) fundido a arco.

As figuras 3.4.16 e 3.4.17 mostram as microestruturas como observadas ao microscópio ótico e eletrônico de varredura, respectivamente, após ataque com água régia.

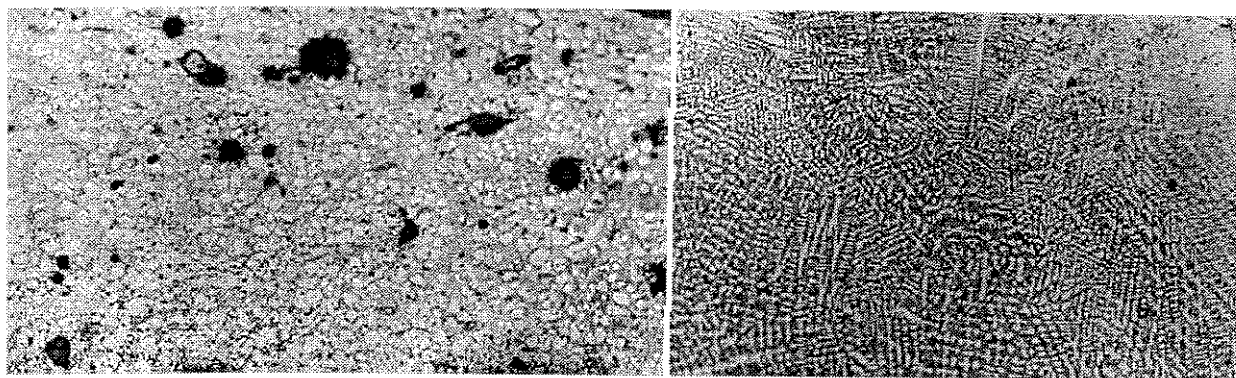


Fig.3.4.16 - Microestrutura dos revestimentos fundidos a chama e a arco, respectivamente. Aumento 200 X. Ataque: Água régia.

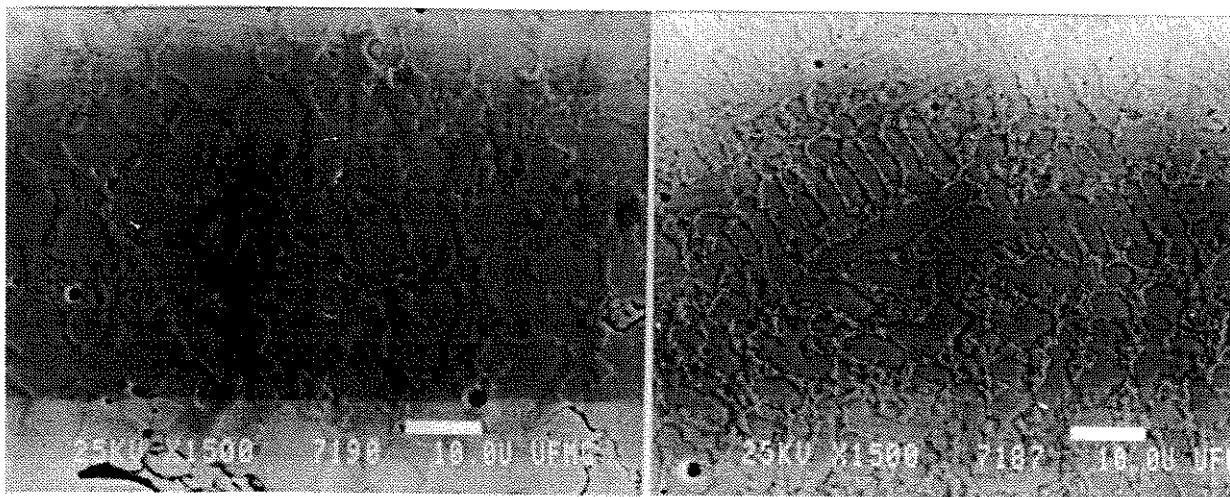


Fig.3.4.17 - Microestrutura dos revestimentos fundidos a chama e a arco, respectivamente. MEV. Ataque: Água régia.

Observa-se basicamente uma estrutura bifásica, com alguns poros no revestimento fundido com chama e marcadamente dendrítica no caso do revestimento fundido com TIG. Esta estrutura será discutida mais detalhadamente no capítulo 4.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

“A imaginação selvagem comporta-se como uma desatinada artista plástica a desenhar morbidez. Torne-se o domador de sua imaginação.”

4.1 - Introdução

Neste capítulo os resultados apresentados no capítulo anterior serão discutidos e comparados com outros resultados e teorias encontradas na literatura. A discussão será feita para cada etapa individualmente e para o conjunto geral dos resultados. Será apresentada ainda uma interpretação geral do estudo feito, tendo em mente o objetivo principal deste, que é a aplicabilidade de revestimentos aspergidos por chama a turbinas hidráulicas como prevenção ao dano cavitacional.

4.2 - Materiais e Equipamentos Utilizados

O aço carbono ABNT 1020 escolhido como substrato para todos os revestimentos testados neste trabalho não é exatamente um material utilizado na fabricação de turbinas hidráulicas. Sua composição química e estrutura são similares a boa parte dos materiais usados na fabricação das turbinas hidráulicas do país, geralmente aços estruturais, segundo um grande fabricante nacional deste tipo de equipamentos (BRANDÃO, 1995). AKHTAR (1982) usou o mesmo tipo de argumentação na escolha do substrato em seu trabalho.

Além disso, aço de baixo teor de carbono tem sido usado no enchimento por soldagem de partes de turbinas desgastadas pela cavitação, de acordo com informações levantadas junto ao

pessoal da área de manutenção de uma concessionária estadual de energia elétrica (ARAÚJO, 1995).

Por outro lado, a composição química e a estrutura do substrato neste caso têm pouca ou nenhuma influência sobre o desempenho dos revestimentos, já que se conseguiu uma aderência destes ao substrato superior à coesão interlamelar. Assim, o material do substrato foi adequado ao estudo pretendido, sem introduzir qualquer fator que pudesse comprometer a aplicabilidade dos resultados obtidos à uma situação real.

A espessura utilizada para o substrato, embora menor do que as normalmente usadas em turbinas, igualmente não comprometeu o estudo, uma vez que o ciclo térmico experimentado pelas peças revestidas foi similar ao que seria experimentado por peças de maior porte. Conforme informações fornecidas pela empresa especializada, onde os revestimentos foram feitos (CAMARGO, 1995), e pelos dados da literatura (AWS, 1985). Assim, neste caso, a espessura influenciou nada ou muito pouco o desempenho dos revestimentos obtidos.

Adicionalmente, o ciclo térmico experimentado por peças de menor espessura tende a ser mais suave (menores velocidades de resfriamento) que o sofrido por peças espessas, sendo assim mais conservativo, na maioria dos casos, isto é, levando a revestimentos com propriedades inferiores.

Os materiais utilizados para a confecção dos revestimentos foram obtidos de diferentes fabricantes, tradicionais fornecedores do mercado, de lotes comerciais, e portanto isentos de qualquer característica comprometedora dos resultados quanto à sua aplicação.

Os equipamentos e condições de aspersão utilizados foram industriais, compatíveis assim com aplicações reais de fabricação ou manutenção..

Os testes e equipamentos de ensaios utilizados também estavam em perfeitas condições de uso e apresentaram resultados coerentes. Equipamentos similares de diferentes instituições (como, por exemplo, os MEV's e rugosímetros da Unicamp e da UFMG, utilizados em diversas etapas) mostraram resultados semelhantes e dentro da faixa de erro intrínseca dos aparelhos.

4.3 - Seleção das ligas

4.3.1 - Aspectos Operacionais

Os corpos de prova da primeira etapa (seleção das ligas) se mostraram suficientes e adequados aos ensaios realizados. O uso do gabarito de fixação dos corpos de prova (figura 3.4.1) facilitou bastante a operação de aspersão, permitindo uma boa uniformidade nos revestimentos depositados nos diferentes CP's, além de minimizar as diferenças entre corpos de prova usinados e não usinados, do ponto de vista de transferência de calor e ciclo térmico, como mostraram as medidas de temperatura feitas durante a aspersão, já que a variação foi similar para ambos os tipos de CP's. A espessura depositada ficou dentro do esperado, com exceção das amostras das condições **b** e **j** (tabela 3.4.I), ambas para a deposição de óxido de cromo. A deposição deste material é bem mais lenta, como pode ser observado pelo número de passes e/ou demãos aplicados, como mostrado no Anexo 2.

O termopar utilizado, de 0,1 mm de diâmetro, é capaz de acompanhar variações bruscas de temperatura, como as observadas em soldagem, e assim pode-se dizer que o ciclo térmico medido foi real. As variações de temperatura observadas estavam de acordo com o esperado. O pico de temperatura durante a operação de revestimento foi sempre inferior a 130°C. A temperatura máxima registrada durante a fusão do revestimento da liga Ni-Cr-B (condição **f**), que foi de 900°C, foi inferior à temperatura nominal de fusão da liga, fornecida pelo fabricante (1.060°C). Entretanto esta temperatura foi medida num CP não usinado, na face oposta à revestida, e portanto a cerca de 15 mm do revestimento fundido, estando assim coerente.

Na literatura pode-se encontrar um número elevado de trabalhos com recomendações para a preparação metalográfica e ataque de amostras aspergidas termicamente. (BLANN, 1991; SMITH, 1991; ASM-AM&P, 1992; BLOCK, 1992 e LEISTNER, 1993), sendo que alguns autores usaram até sistemas informatizados de análise de imagens (FOWLER, 1990 e BLUNI, 1991) na tentativa de se obter resultados confiáveis e repetitivos. Neste trabalho não

se fez nenhuma análise ou avaliação metalográfica rigorosa, que recorresse, por exemplo, a técnicas de metalografia quantitativa. Assim, para a preparação das amostras para exame metalográfico dos CP's dos testes preliminares e outras etapas posteriores, seguiu-se uma metodologia usada por FREITAS (1995), que já havia se mostrado adequada, e que foi descrita na seção 3.4.2.

4.3.2 - Características dos Revestimentos

Os revestimentos obtidos apresentaram uma estrutura lamelar típica, com alguma porosidade e partículas não fundidas, como mostra a figura 4.3.1. Exceto o revestimento na condição **f** (tabela 3.4.I), fundido, que como era de se esperar, apresentou uma estrutura uniforme, embora com um nível de porosidade aparentemente mais elevado que o usual, como mostrado na figura 4.3.2. Segundo o fabricante, este revestimento não deveria apresentar porosidades após a fusão.

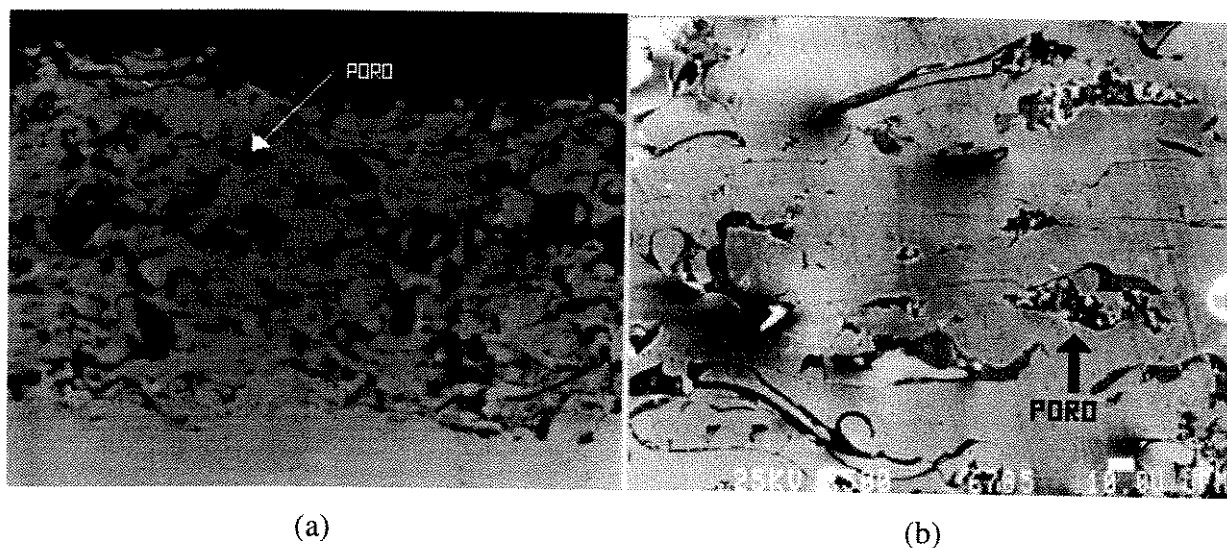


Fig. 4.3.1 - Corte transversal mostrando o aspecto lamelar típico dos revestimentos obtidos. Liga Ni-Cr-Mo-Al. (a) Microscopia Ótica, aumento 125 x, (b) MEV.

Foi possível observar diferenças na estrutura de revestimentos depositados a partir de pó e de arame ou cordão. Como é sabido (AWS, 1985), na aplicação a partir de arames, a velocidade alcançada pelas partículas é mais alta, levando a uma maior coesão das lamelas entre si e a uma menor quantidade de porosidade. As figuras 4.3.3 e 4.3.4 mostram cortes

transversais e superfícies como aspergidas, respectivamente, de revestimentos depositados com cordão e pó.

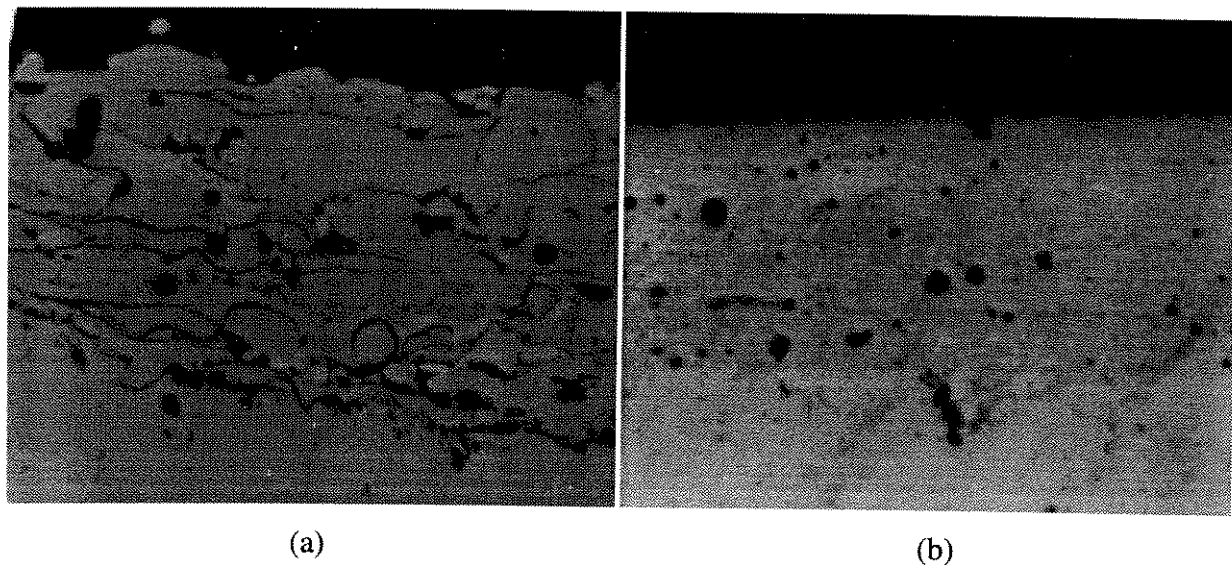


Fig. 4.3.2 - Corte transversal mostrando o aspecto do revestimento obtido com a liga Ni-Cr-B. Microscopia Ótica, aumento 125 x. (a) como aspergido, (b) fundido.

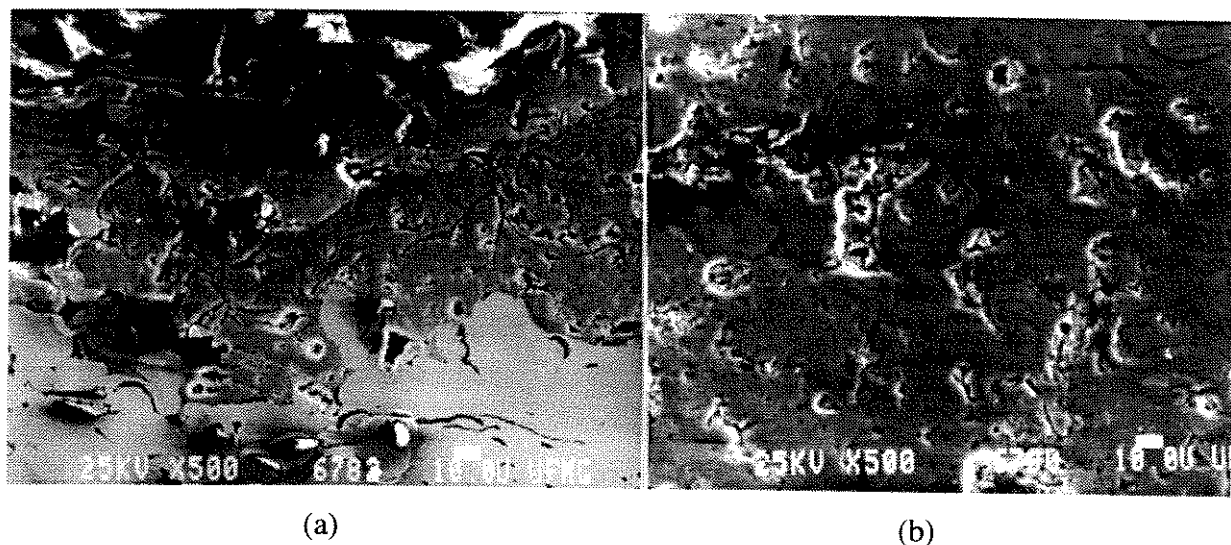


Fig. 4.3.3 - Corte transversal mostrando o aspecto lamelar típico dos revestimentos obtidos. Óxido de cromo (a) a partir de pó, (b) a partir de cordão. MEV.

Pequenas trincas inter e intralamelares puderam ser observadas tanto nos revestimentos cerâmicos quanto metálicos, como se vê nas duas primeiras fotos da figura 4.3.4, indicadas por setas. Estas trincas parecem ser normais em revestimentos depositados por aspersão térmica, pois foram observadas em outros os revestimentos, particularmente cerâmicos e em outros trabalhos (CAMARGO, 1995).

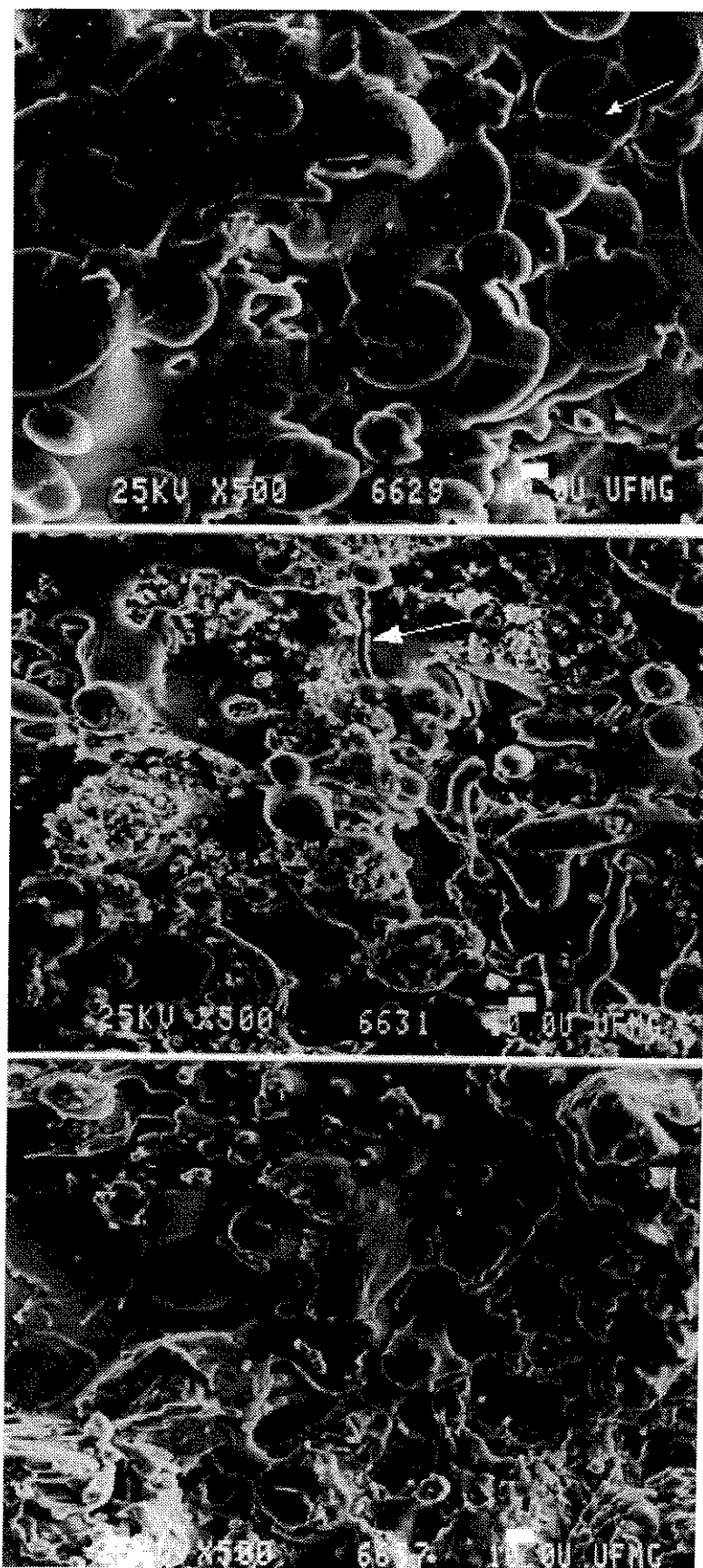


Fig. 4.3.4 - Superfície como aspergida de material cerâmico e metálico a partir de pó e metálico a partir de arame (CP's 3, 9 e 27, tabela 3.4.I), respectivamente. MEV.

A rugosidade dos corpos de prova aspergidos é elevada e bem acima da faixa usual de peças usinadas. O comprimento de amostragem *le*, ou de “cutoff”, como é referido nos aparelhos utilizados, foi principalmente o de 2,5 mm, menor portanto que o indicado pela ABNT para boa parte da faixa de rugosidades encontrada, mas entretanto era o maior possível nos aparelhos disponíveis. A rugosidade medida por diferentes aparelhos mostrou-se bastante próxima, o que era de se esperar, já que os rugosímetros foram calibrados com superfície padrão antes das medições serem feitas.

Um “cutoff” de 0,8 mm precisou ser usado para facilitar algumas medidas, como será discutido a seguir. Assim, realizou-se uma série completa de medidas em todos os corpos de prova com “cutoff” de 0,8 mm, para comparação. Como era esperado, os valores de rugosidade obtidos com este “cutoff” foram menores (em torno de 75%, em média, do valor original) que os obtidos com “cutoff” de 2,5 mm.

Muitas medições foram difíceis de serem feitas, pois freqüentemente o processo era interrompido automaticamente, quando o fundo de escala dos aparelhos era excedido. Quando isto acontecia, uma nova linha de medição era escolhida, reposicionando-se o apalpador e o processo reiniciado. Isto mostra que a medição de rugosidade elevada, em valores próximos do valor máximo mensurável nos aparelhos com apalpamento mecânico pode variar bastante, sendo fortemente influenciada pela linha sobre a qual a medição é feita. É claro que, nestes casos, os valores obtidos tendem a ser menores que os valores reais.

Como esperado, pelo aspecto da superfície (figura 4.3.4) e pelas dificuldades no processo de medição, a dispersão das medidas de rugosidade foi bastante elevada. O Coeficiente de Variação (C.V.), isto é, o valor percentual do desvio padrão em relação à média, ficou, na maioria dos casos, em torno de 10%, chegando a superar 20% em alguns casos.

4.3.3 - Influência da Rugosidade do Substrato na Rugosidade do Revestimento

Diferentemente do citado na literatura (AWS, 1985), a rugosidade inicial do substrato não influenciou fortemente a rugosidade final dos revestimentos. Dentro dos limites

utilizados, isto é, jateamento com areia e alumina, que resultaram em rugosidades R_a respectivamente de 2,2 e 8,2 μm , pode-se afirmar com base em testes estatísticos que não houve diferença significativa na rugosidade dos revestimentos sobre a superfície jateada com um ou outro meio.

Isto indica que a relação entre rugosidade do substrato e rugosidade final do revestimento depende dos valores relativos da rugosidade do substrato, do tamanho das partículas de pó (se for o caso), dos parâmetros de operação durante a aspersão e das condições para medição da rugosidade ("cutoff"). Isto porque, se as gotículas que formarão o revestimento forem muito menores (figura 4.3.5 - a) ou muito maiores que os sulcos do substrato, ou com pouca plasticidade (figura 4.3.5 - b), o revestimento tende a ser menos rugoso. A figura 4.3.5 - c mostra esquematicamente uma situação em que a rugosidade final do revestimento acompanha a rugosidade do substrato.

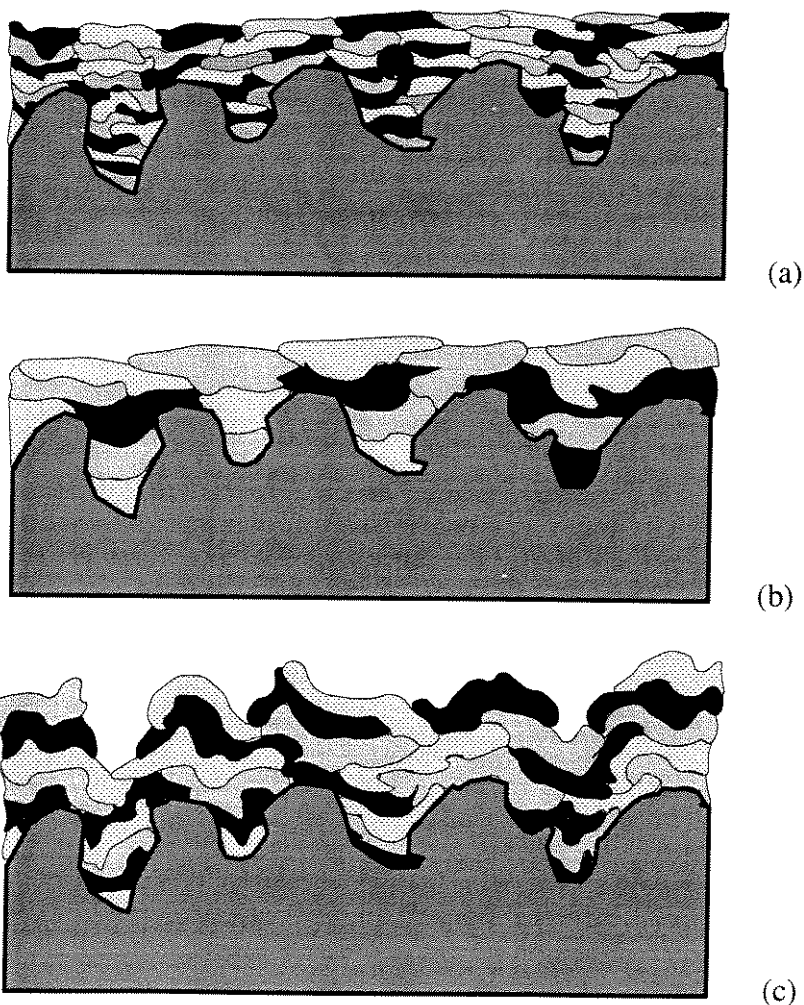


Fig. 4.3.5 - Desenho esquemático mostrando a relação da rugosidade do revestimento com o tamanho e plasticidade das lamelas e rugosidade do substrato.

Este resultado está de acordo com estudo de VARDELLE e co-autores (1994), que observaram a dependência do achatamento (e portanto da rugosidade do revestimento) e da velocidade de resfriamento das gotículas aspergidas com a velocidade, o tamanho e a temperatura das partículas no impacto, com o substrato, além da rugosidade e temperatura deste.

Como já dito no capítulo 3 (seção 3.4.2), as medidas de rugosidade foram tomadas sobre linhas aproximadamente paralelas, em duas direções perpendiculares, orientadas ao acaso em relação à direção de deslocamento da tocha de aspersão. Com base em testes estatísticos, não se observou nenhuma influência significativa desta direção na rugosidade, como pode ser conferido nas tabelas do Anexo 3. Lá, a primeira metade das medidas individuais foi tomada numa direção e a outra numa direção perpendicular. A Tabela 4.3.I resume as comparações feitas anteriormente para as medidas obtidas de rugosidade superficial.

Tabela 4.3.I - Comparação de medidas de rugosidade em diferentes condições				
Rugosidades Ra (μm) - Média de 6 medidas (mínimo)				
Material	Jateado com alumina		Jateado com areia	
	"Cutoff" 0,8 mm	"Cutoff" 2,5 mm	"Cutoff" 0,8 mm	"Cutoff" 2,5mm
Alumina/Titânia	10,87 $\pm$ 10,4%	8,07 $\pm$ 10,5%	11,05 $\pm$ 7,7%	
Óx. Cromo - Pó	10,33 $\pm$ 9,0%	8,32 $\pm$ 11,1%	10,89 $\pm$ 8,5%	
Ni/Cr/Mo s/b	17,00 $\pm$ 7,3%	14,63 $\pm$ 24,3%		
Ni/Cr/Mo c/b	21,71 $\pm$ 5,9%	19,15 $\pm$ 21,0%		15,56 $\pm$ 18,0%
Inox 316	22,36 $\pm$ 5,4%	17,77 $\pm$ 10,7%	16,81 $\pm$ 10,2%	
Ni/Cr/B Fundido	6,08 $\pm$ 18,1%	2,78 $\pm$ 19,8%		
Ni/Cr/B s/fundir	19,27 $\pm$ 9,1%	17,63 $\pm$ 10,4%		
Broze-alumínio	13,51 $\pm$ 10,4%	8,79 $\pm$ 21,8%	15,87 $\pm$ 10,6%	
Inox 420	17,06 $\pm$ 9,5%	10,96 $\pm$ 16,4%	14,70 $\pm$ 8,7%	
Óx. Cr - Cordão	10,85 $\pm$ 5,4%	8,25 $\pm$ 18,0%	15,79 $\pm$ 6,3%	
Substrato	8,20 $\pm$ 12,6%		2,20 $\pm$ 18,6%	1,85 $\pm$ 9,7%

Todos os testes de hipótese de igualdade das médias obtidas experimentalmente foram feitos para um intervalo de confiança de 95%, utilizando-se o programa estatístico STATGRAPHICS, versão 5.0.

As medidas de dureza também apresentaram uma dispersão relativamente elevada. A Tabela 4.3.II mostra os valores observados e os esperados segundo dados do fornecedor das ligas. Para conversão numa mesma escala utilizou-se a norma ASTM. E 140 (1984). Considerou-se o aço carbono como material base para todas as conversões. Isto não foi estritamente correto, mas como não há dados específicos para todos os materiais utilizados, preferiu-se uniformizar a conversão utilizando-se o substrato como material de referência.

Tabela 4.3.II - Dureza Rockwell C					
Condição/ Material	Medida diretamente		Estimada pela dureza Rockwell C Superficial média (carga 15 kgf)	Estimada pela microdureza Vickers média	Dada pelo Fabricante
	Média	C.V.			
a	66	10,80	54	64	60-63
b	46	13,89	< 20	44	65
c	54	9,29	21	< 20	30
d	64	6,08	22	45	30
e	60	10,76	<20	49	30
f	65	4,87	32	51	30-35
g	66	12,71	24	51	
h	47	6,46	< 20	< 20	
i	67	5,40	27	39	
j	65	3,70	28	59	

Como a superfície da amostra como aspergida é muito rugosa, as medidas de dureza Rockwell superficial foram difíceis de serem feitas, já que muitas vezes o penetrador se apoiava apenas parcialmente sobre uma lamela do revestimento, introduzindo assim uma tendência à obtenção de baixos valores de dureza. As medidas de microdureza também foram difíceis de serem feitas, pois além da dificuldade para se encontrar uma área uniforme suficientemente grande para as medições, havia uma certa dificuldade em se distinguir com precisão os limites da impressão deixada pelo penetrador, em função das muitas áreas de diferentes colorações presentes no revestimento

Quanto à dureza medida diretamente, curiosamente os valores obtidos tenderam a ser mais elevados que o esperado, com exceção da condição **b** (tabela 3.4.I). Neste caso específico (condição **b**), apesar de se ter tentado depositar revestimentos com um mínimo de 0,3 mm, a espessura do revestimento pode ter comprometido a medição. Nos outros casos o fato de se ter usado uma carga inferior à usual (62,5 kg ao invés de 150) pode ter induzido esta

tendência para valores elevados. Esta escala foi usada numa tentativa de se minimizar o efeito da espessura da camada de revestimento.

Deve-se ressaltar aqui que, como a dureza não é uma característica que se relaciona diretamente e de maneira inequívoca com a resistência à cavitação, como mostrado no capítulo 2, não se teve, nesta etapa, preocupação com o rigor e exatidão dessas medições. Elas foram consideradas apenas exploratórias e indicativas da qualidade dos revestimentos depositados, juntamente com outros ensaios, como os metalográficos.

4.3.4 - O Ensaio Acelerado de Cavitação Induzida por Vibração Ultra-sônica

Os resultados dos muitos ensaios de cavitação realizados mostrou que após um certo tempo de teste observa-se um ataque diferenciado em regiões distintas do corpo de prova, como mostra a figura 4.3.6. A região próxima à periferia da amostra sofre pouco desgaste. Na região mais interna, logo a seguir, podem-se observar crateras alongadas mais profundas, na direção radial. Na região central as crateras são mais circulares e distribuídas ao acaso. Nestas duas últimas regiões, as crateras estão superpostas a uma superfície erodida de modo mais ou menos homogêneo.

Nos estágios iniciais do ensaio acelerado de cavitação vibratória de aço inoxidável AISI 304, AHMED (1991) também observou um ataque mais acentuado numa região a 6 mm do centro da amostra, o que sugere ser este um efeito das condições geométricas do teste.

De modo geral, a repetitividade do ensaio foi muito boa, como se pode observar pelas superfícies cavitadas de diferentes corpos de prova de aço carbono trefilado, mostradas na figura 4.3.7, e pelas curvas de perda de massa acumulada destes mesmos CP's, mostrada na figura 3.4.3 (J1 e J2) ou pelas curvas TIG1 e TIG2 da figura 3.4.14.

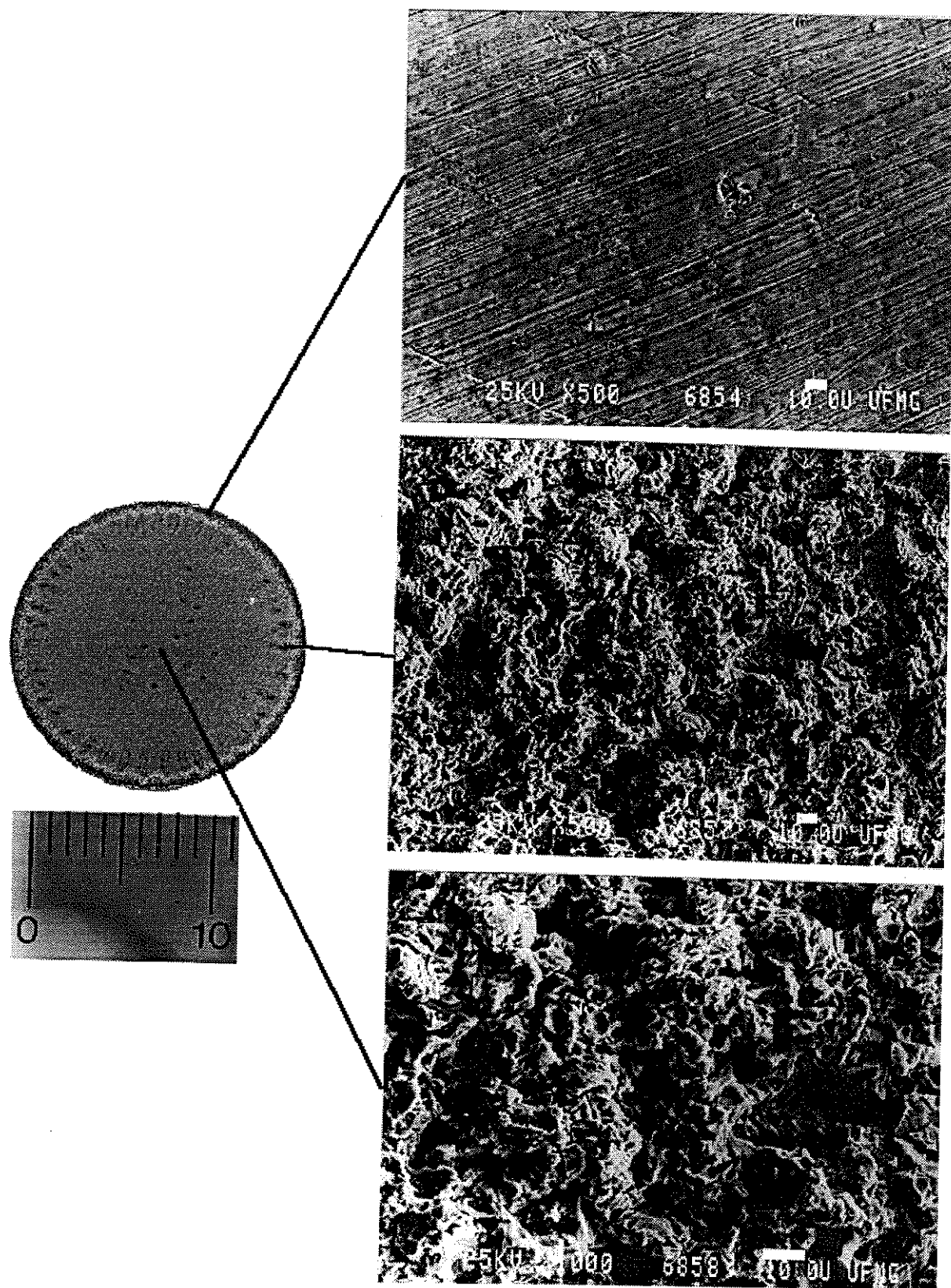


Fig. 4.3.6 - Superfície cavitada de um CP de aço carbono trefilado após 200 minutos de ensaio. MEV.

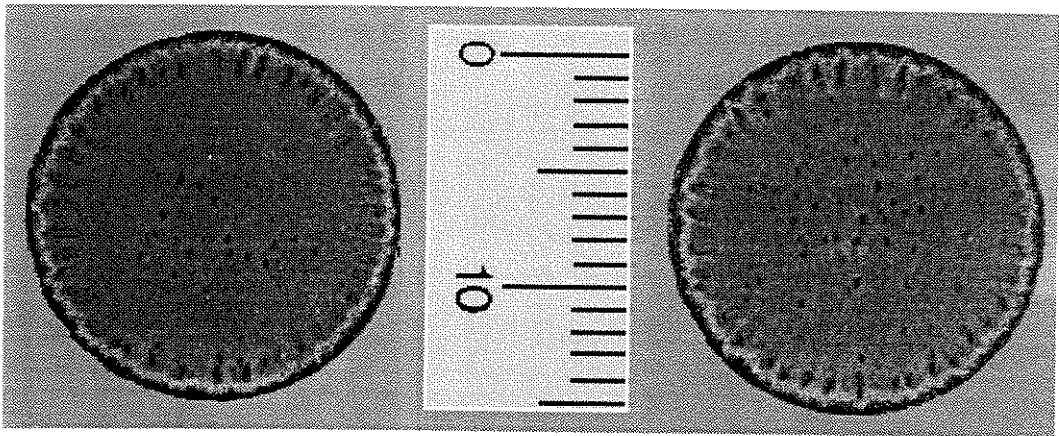


Fig. 4.3.7 - Superfície cavitada de dois CP's de aço carbono trefilado após 200 minutos de ensaio. Lupa

Como citado na literatura (capítulo 2), as taxas de perda de massa com o tempo podem variar bastante durante um ensaio e de um ensaio para outro, mas as curvas de perda de massa acumulada com o tempo tendem a ser mais repetitivas. As discrepâncias podem ser creditadas a oscilações nas condições de ensaio e nas propriedades do material de diferentes corpos de prova. A norma ASTM G-32/85 admite como normais variações de até 20% nos resultados, para as mesmas condições.

As curvas de perda de massa acumulada em função do tempo, no período estacionário, podem ser ajustadas por uma reta de equação:

$$M = r t + M_0 , \quad (4.1)$$

onde M é a massa perdida após um tempo de ensaio t , r é uma constante relacionada à resistência do material ao dano cavitacional e M_0 é uma constante relativa à perda inicial de massa ou, alternativamente, ao tempo de incubação. As unidades destas constantes podem ser atribuídas arbitrariamente para dar consistência dimensional à equação, em função das unidades de medida usadas para a perda de massa e o tempo. Este mesmo tratamento foi usado por ARAÚJO (1996).

Quanto menor o valor de r , maior a resistência à perda de massa por cavitação. Assim, pode-se definir $R=1/r$ como um valor diretamente relacionado à resistência à cavitação. Valores de M_0 positivos indicam grande perda inicial de massa e valores negativos indicam

pouca perda inicial de massa ou, alternativamente, a existência de um tempo de incubação (T_0), que pode ser determinado fazendo-se $M=0$ na equação (4.1). Valores de R e T_0 serão calculados e usados para comparação do desempenho de corpos de prova utilizados neste trabalho.

4.3.5 - Resistência à Cavitação das Ligas Testadas

Os ensaios de cavitação (figura 3.4.3) mostraram que, apesar de todas as ligas usadas nesta etapa serem recomendadas como resistentes à cavitação, os revestimentos depositados por aspersão térmica a chama, na condição como aspergidos, apresentaram desempenho muito inferior ao esperado.

No geral, pode-se observar grandes perdas de massa em pequenos intervalos de tempo, particularmente para os materiais cerâmicos, alumina-titânia e óxido de cromo. Mesmo os revestimentos metálicos perderam massa rapidamente, numa velocidade muito maior que o próprio aço carbono. Somente a liga fundida apresentou maior resistência ao dano cavitacional que o material de referência.

Materiais como o bronze-alumínio e os aços inoxidáveis AISI 316 e 420, fundidos, trefilados, laminados e até mesmo como soldados, são reconhecidamente resistentes ao ataque cavitacional e têm sido usados em aplicações nas quais ocorre cavitação, como propelentes de embarcações, válvulas e turbinas hidráulicas, com bons resultados (EISENBERG, 1966; KNAPP, 1970 e ARAÚJO, 1995). Entretanto, na forma como aspergida por chama, o desempenho foi péssimo.

Como esperado e citado na literatura (KARIMI, 1996), as taxas de perda de massa de um mesmo material variaram de um ensaio para outro, ou até no decorrer de um mesmo ensaio. Já as curvas de perda de massa acumulada tendem a ser mais repetitivas, como se observou nesta etapa.

Observou-se uma perda de massa elevada nos primeiros instantes de ensaio, o que provavelmente se deveu ao fato de que as amostras foram ensaiadas como aspergidas, não tendo sido feita nenhuma limpeza após a operação de revestimento. A parte lateral dos corpos de prova, que ficou exposta ao jato de aspersão uma vez que estava para fora do gabarito usado como suporte, recebeu algum material. Este material entretanto devia apresentar muito pouca adesão ao substrato, já que esta região não foi preparada para ser revestida (limpa e jateada). Assim, quando a amostra foi imersa em água e submetida à vibração ultra-sônica, este material possivelmente se soltou, fazendo com que a taxa inicial fosse elevada.

Apenas em uma amostra o revestimento se soltou como um todo (numa condição não usual de aspersão, **g** da tabela 3.4.I). Nos outros casos, a erosão do revestimento foi a usual, observando-se na água destilada do ensaio partículas pequenas em suspensão ou, em outras palavras, a água ia se turvando à medida que o ensaio prosseguia. Tanto para amostras com revestimento cerâmico quanto metálico (ver anexo 3), este apresentou algumas vezes um “furo” no centro, atingindo o substrato como, por exemplo, o mostrado na figura 4.3.10. Em outros casos o substrato ficou exposto em outras áreas do corpo de prova (como o CP B da figura 3.4.7). Nestes casos o ensaio era interrompido.

Em função do observado nos parágrafos anteriores e como já dito no capítulo 3, suspeitou-se de uma coesão muito baixa entre as lamelas dos revestimentos depositados, que poderia estar facilitando a retirada de material da superfície. Isto não estaria ocorrendo nos CP's revestidos e fundidos posteriormente, que apresentaram boa resistência à cavitação, já que a estrutura lamelar foi destruída na fusão. Ainda como dito no capítulo 3, testes específicos foram feitos para se esclarecer este ponto, quais sejam, variação nos parâmetros de aspersão, revestimento com aço carbono e identificação dos mecanismos de perda de massa.

4.4 - Variação nos Parâmetros de Aspersão

Como a coesão entre as partículas estava aparentemente muito baixa, em função do desempenho insatisfatório da maioria das ligas testadas no ensaio de cavitação, tentou-se melhorar a coesão interlamelar alterando-se os parâmetros de aspersão de modo a aumentar a velocidade e/ou o estado de plasticidade (temperatura) das partículas ao atingir o substrato. Isto foi feito para o bronze-alumínio e o aço inoxidável martensítico, aplicados a partir de arame.

Tentou-se aumentar a vazão de oxigênio e gás combustível (para melhorar a plasticidade, em função do aumento na quantidade de energia disponível) e aumentar a pressão de ar comprimido (para aumentar a velocidade das gotículas), individualmente e em conjunto. Entretanto, as variações possíveis sem comprometer a estabilidade do processo de aspersão foram relativamente pequenas (cerca de 10% para o acetileno, 2,5% para o oxigênio e 21 % para a pressão de ar).

Pode-se dizer que, de um modo geral, apesar de pequenas, as variações nos parâmetros de aspersão resultaram em alguma alteração nas características dos revestimentos, se observadas a diminuição da rugosidade superficial e o aumento da tensão para rompimento medida no ensaio de adesão (tabela 3.4 V), particularmente para o bronze-alumínio. Do ponto de vista de resistência à cavitação, não houve uma melhoria significativa, como mostrado na figura 3.4.4, em termos de perda de massa com o tempo, em relação aos resultados anteriores e ao desempenho do aço carbono.

Examinando-se com mais detalhe através dos valores de **R** (como definido na seção 4.3.4), mostrados na Tabela 4.4.I, pode-se dizer que houve mesmo uma pequena diminuição na resistência ao dano cavitacional do revestimento de aço inoxidável AISI 420, possivelmente associada à maior quantidade de energia absorvida pelo material, já que este é martensítico e obtém melhores propriedades com maiores velocidades de resfriamento. Já o bronze-alumínio praticamente dobrou sua resistência, fato confirmado pelo exame das superfícies dos corpos de prova ensaiados, que apresentaram um certo “refinamento” quando a aspersão foi feita com parâmetros mais favoráveis, como mostra a figura 4.4.1. Isto se deve, possivelmente, a uma melhor coesão entre as lamelas do revestimento. Apesar desta melhora, seu desempenho continuou inferior ao do aço carbono.

Tabela 4.4.I - Valores de R			
Bronze-Alumínio		Aço Inoxidável AISI 420	
Amostra	R	Amostra	R
O	0,993	Q	2,825
P	0,852	AN	2,070
BA	1,629	AT	2,217
BT	1,608		

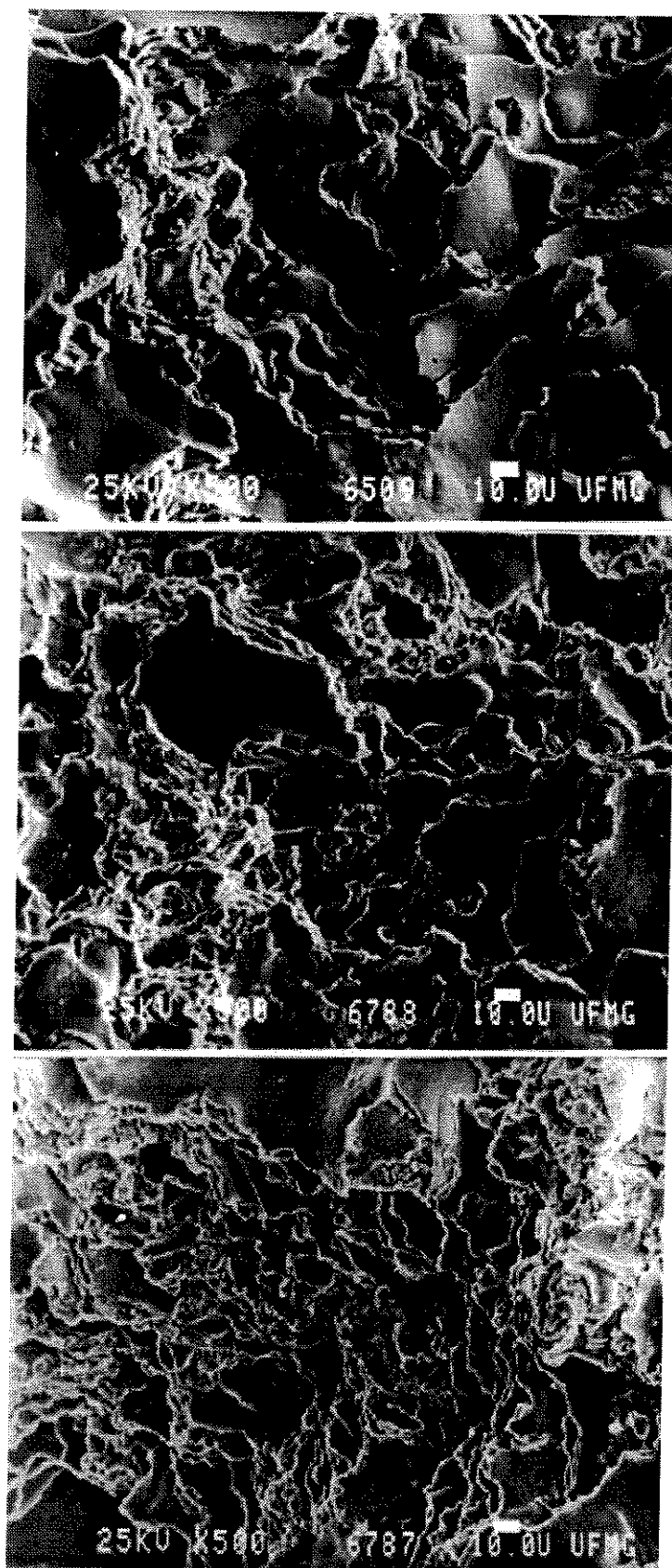


Fig. 4.4.1 - Efeito da variação nos parâmetros de aspersão na aparência da superfície cavitada do revestimento de bronze-alumínio - MEV.
(respectivamente, CP's BN, BG e BT)

4.5 - Revestimento com Aço Carbono

Como pode ser observado na figura 3.4.6, também os revestimentos aspergidos de aço carbono apresentaram um baixo desempenho quanto ao desgaste cavitacional, muito inferior ao do material similar do substrato. Entretanto, como observado por MODENESI (1995), revestimentos de aço carbono depositados por soldagem a partir de eletrodos revestidos do tipo AWS E 7018 apresentaram desempenho muito superior ao do aço carbono ABNT 1020, como mostrado na figura 4.5.1 (AC).

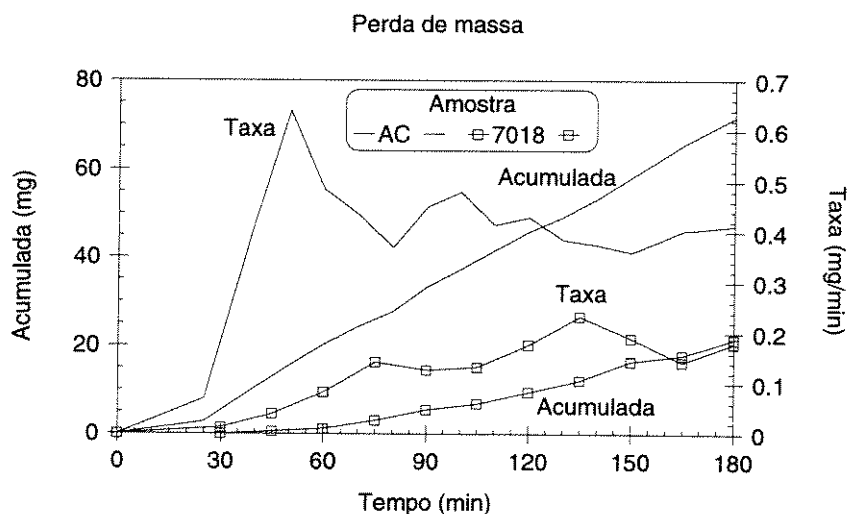


Fig. 4.5.1 - Desempenho do revestimento de aço carbono soldado (7018) e trefilado (AC), segundo dados de MODENESI (1995).

Este resultado reforça a idéia de que o mal desempenho observado para os revestimentos aspergidos na etapa de seleção das ligas se deveu principalmente à estrutura resultante do processo de aspersão térmica a chama, já que revestimentos do mesmo material (aço baixo carbono) tiveram comportamentos completamente diferentes, dependendo do método de deposição (aspersão ou soldagem). Convém salientar que o mesmo material no estado trefilado apresentou um comportamento intermediário.

4.6 - Mecanismos de Perda de Massa

O exame das superfícies cavitadas (figura 3.4.7 e 3.4.8) sugere que os mecanismos de perda de massa dos revestimentos na condição como aspergida e fundido após aspersão são

diferentes. No primeiro caso, observa-se uma superfície com aparência de fratura frágil, sem deformação, com muitos patamares lisos e mesmo trincas (figura 3.4.8-a). No segundo, e também para o aço carbono trefilado, a superfície mostra-se bastante deformada plasticamente, com indicação de desgaste dúctil, como visto na figura 3.4.8-b e na figura 4.6.1, a seguir, respectivamente para o revestimento fundido e o aço carbono. Estes resultados são coerentes com os resultados dos ensaios de cavitação mostrados na figura 3.4.3.

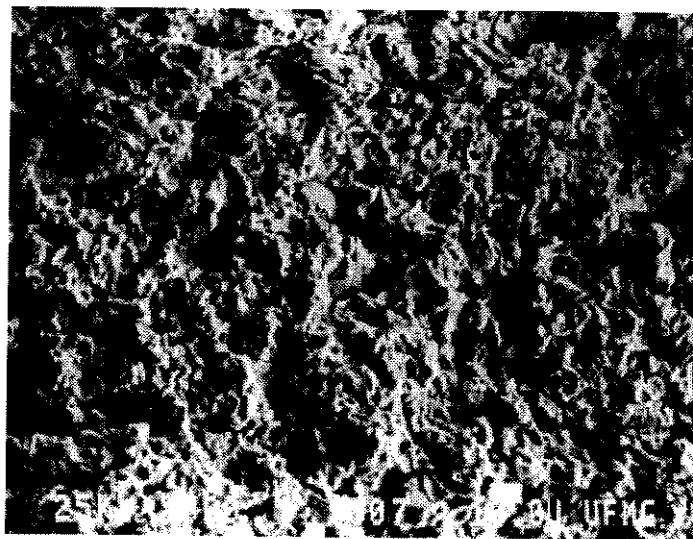


Fig. 4.6.1 - Superfície do aço carbono após ensaio de cavitação. MEV.

O exame dos resíduos recolhidos durante o ensaio de cavitação também ajudou a evidenciar os mecanismos de perda de massa. Os resíduos dos revestimentos como aspergidos são formados por decoesão e quebra na direção da espessura de lamelas ou grupos de lamelas originais, como pode ser visto no detalhe da figura 3.4.9-a mostrado na figura 4.6.2. Já o resíduo do revestimento fundido e do aço carbono se formam por deformação plástica e ruptura do material, como se vê nas figuras 3.4.11 e 3.4.12, particularmente, em pleno acordo com os resultados do ensaio de cavitação (figura 3.4.3) e com as superfícies observadas anteriormente.

Também pode ser observado que quanto mais resistente o material à cavitação, mais “finas” tendem a ser as superfícies ensaiadas e as partículas do resíduo. Esta mesma tendência foi observada por outros autores (VYAS, 1987 e MODENESI 1995).



Fig. 4.6.2 - Detalhe da figura 3.4.9-a.

4.7 - Teste com o Disco de Revestimento

Este teste mostrou que a permanência das partículas de resíduo imersas no líquido de ensaio sob vibração ultra-sônica no decorrer deste não as modifica após serem removidas da superfície. Este resultado era esperado, tendo em vista o tamanho e forma das partículas de resíduo observadas inicialmente, as superfícies após ensaio e o resultado do teste de cavitação na etapa de seleção das ligas, particularmente a taxa de perda de massa, para materiais pouco e muito resistentes ao dano cavitacional. Assim, era muito mais provável que o inesperado tamanho similar das partículas de resíduo observado inicialmente fosse devido à técnica de preparação deste para observação ao MEV.

4.8 - Influência da Técnica de Preparação do Resíduo

Comparando-se os resíduos mostrados nas figuras 3.4.11 e 3.4.12 nota-se que aqueles preparados por centrifugação são muito mais finos que os obtidos por filtração e secagem. Isto mostra que a exposição das partículas recolhidas a temperaturas e tempos relativamente elevados na técnica da filtração e secagem (respectivamente cerca de 400 °C e 1h, neste caso) permitiu uma aglomeração intensa destas, resultando no resíduo grosseiro observado inicialmente.

Mesmo a técnica de centrifugação e secagem a uma temperatura mais baixa (100 °C, neste caso) levou a uma certa aglomeração, mas agora mais fácil de ser percebida (figura 3.4.11). Assim, o resíduo preparado por esta técnica foi imerso novamente em uma pequena quantidade de álcool e colocado numa cuba de limpeza ultra-sônica por cinco minutos. Uma pequena quantidade da suspensão obtida foi colocada no porta amostras e novamente observada ao MEV. O resultado final é mostrado na figura 4.8.1, onde se vê o tamanho real das partículas arrancadas durante o ensaio de cavitação da liga fundida após aspensão.



Fig. 4.8.1 - Resíduo da liga fundida centrifugado e submetido a vibração ultra-sônica - MEV.

Estes resultados mostraram que a observação do resíduo obtido no ensaio acelerado de cavitação induzida por vibração ultra-sônica ao microscópio eletrônico de varredura é bastante útil na identificação dos mecanismos de perda de massa e que a técnica de preparação do resíduo para observação é crítica, podendo levar a resultados incorretos se não for adequadamente escolhida e executada.

4.9 - Influência das Características Superficiais na Resistência à Cavitação

O ensaio de cavitação das diferentes amostras de aço carbono mostrou que a condição superficial do corpo de prova tem maior influência nas etapas iniciais do ataque cavitacional, influenciando o tempo de incubação (Fig. 3.4.13). Nas amostras jateadas e usinada, o ataque e a perda de material ocorrem já a partir dos primeiros instantes sob cavitação, enquanto que, nas

amostras polidas, a perda de massa ocorre apenas depois de algum tempo de ensaio (nestes casos, um tempo de incubação da ordem de 40 minutos). Contudo, a inclinação da curva de perda de massa acumulada com o tempo parece essencialmente a mesma, como visto na figura 3.4.13. Este mesmo resultado foi obtido por SANTOS (1995).

Entretanto, examinando-se mais detalhadamente, estes efeitos não ficam assim tão claros. Como se vê na figura 4.9.1 e na Tabela 4.9.I, pequenas variações nas condições superficiais influenciam o desempenho dos corpos de prova no ensaio de desgaste por cavitação. Neste caso, estas diferenças possivelmente estão associadas a diferenças na pressão de ar comprimido e/ou tempo no jateamento e à profundidade da camada retirada durante o polimento. Entretanto, também é possível que as diferenças de desempenho observadas no ensaio de cavitação sejam devidas a diferenças de encruamento superficial dos corpos de prova, o que também está de acordo com a literatura.

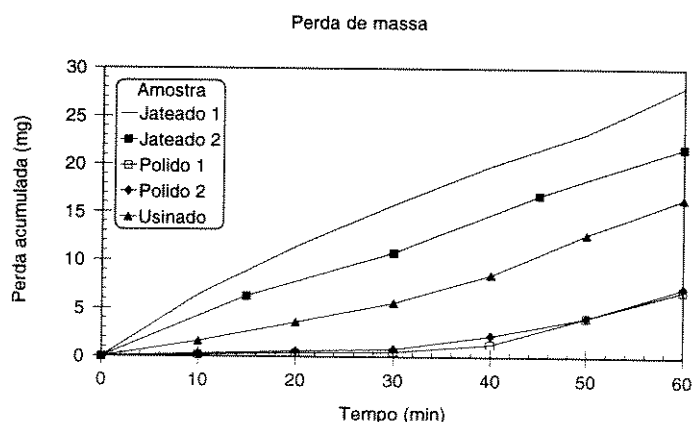


Fig. 4.9.1 - Resultado de ensaio de cavitação do aço ABNT 1020.

Tabela 4.9.I - Valores de R e T ₀		
Amostra	R	T ₀ (min)
Jateado 1	2,183	0,0
Jateado 2	2,062	10,7
Polido 1	2,415	31,9
Polido 2	2,874	23,5
Usinado 1	2,469	12,7

Na literatura, os resultados são contraditórios quanto ao efeito da rugosidade inicial, como observado, por exemplo por AHMED (1991b) e co-autores, que por sua vez também constatarem um efeito significativo de pequenas irregularidades superficiais na evolução da

erosão por cavitação. GUO (1986) detectou tanto pequenas quanto grandes diferenças nas taxas de erosão de revestimentos de WC/Co depositados por plasma com os mesmos parâmetros operacionais, dependendo da composição química e do método de fabricação do pó, quando testou amostras como aspergidas e polidas com diamante até 0,25-0,5 μm .

De um modo simplificado, pode-se considerar que o tempo de incubação está relacionado ao estado de encruamento da superfície. Assim, as amostras jateada e usinada, que tinham sua superfície encruada pelo trabalho mecânico (jateamento e/ou usinagem), começaram a perder massa mais rapidamente, enquanto as amostras polidas, que tiveram esta camada encruada retirada durante o polimento, só começaram a perder massa após um tempo de incubação, necessário para encruar a superfície.

Nos ensaios iniciais deste trabalho, os revestimentos foram testados como aspergidos e portanto com diferentes rugosidades iniciais. Contudo, em vista dos resultados obtidos, acredita-se que qualquer efeito devido à rugosidade superficial na resistência ao dano cavitacional, se existiu, terá sido desprezível. Isto porque, a menos das variações estruturais em função das características intrínsecas do revestimento (composição química, fases presentes, dureza, etc.), todos os revestimentos foram ensaiados na mesma condição, o que, neste caso, equivale dizer que as superfícies estavam provavelmente encruadas e com elevado nível de tensões internas, como resultado da operação de aspersão e dos elevados gradientes térmicos e velocidades de resfriamento.

AHKAR (1982) e GUO (1986) também não observaram período de incubação em teste de cavitação de revestimentos cerâmicos e metálicos aspergidos com plasma, o que reforça o que foi dito no parágrafo anterior.

4.10 - Fusão com TIG e Caracterização Estrutural da Liga Ni-Cr-B

Os resultados do ensaio de cavitação das amostras fundidas com arco TIG e com chama foram muito semelhantes, como visto na figura 3.4.14. Analisando com mais detalhes, através dos parâmetros **R** e **T₀** mostrados na Tabela 4.10.I, já definidos na seção 4.3.4 e usados

anteriormente, pode-se dizer que houve mesmo uma melhora no desempenho à cavitação dos revestimentos fundidos com arco, em função dos aumentos observados para os valores destes parâmetros neste caso. Isto provavelmente se deve às diferenças estruturais do revestimento fundido a arco, como visto nas figuras 3.4.16 e 3.4.17, como será discutido adiante.

Tabela 4.10.I - Valores de R e T ₀			
Amostra	Fusão	R	T ₀
K	Chama	12,346	13,0
L	Chama	8,696	0,1
TIG 1	Arco	13,333	30,7
TIG 2	Arco	12,658	25,6

A composição química do pó Metco 12 C determinada por análise por energia dispersiva de raios-X (EDS) em microsonda eletrônica (tabela 3.4.VIII) foi, em números absolutos, ligeiramente diferente da composição nominal, fornecida pelo fabricante. Contudo, como não é possível detectar os elementos Carbono e Boro com o instrumental utilizado e como a composição final da análise é dada na forma normalizada (isto é, a soma dos teores percentuais sempre dá 100), pode-se dizer que as composições determinadas experimentalmente e fornecida pelo fabricante são essencialmente iguais.

As composições determinadas para o revestimento como aspergido e fundido com chama também são praticamente iguais à do pó, considerando-se o erro experimental. Já a composição determinada para os revestimentos fundidos a arco sugere alguma alteração do revestimento (tabela 3.4.VIII).

Para o revestimento fundido com chama, a temperatura média atingida pelo substrato foi da ordem de 900°C (seção 3.4.2), nas condições deste trabalho, que parece um tanto baixa para causar sua fusão. Segundo o fabricante (Anexo 1), a temperatura nominal de fusão do revestimento é da ordem de 1100°C, ainda um tanto abaixo da temperatura nominal de fusão do substrato, da ordem de 1500°C, mesmo considerando um certo superaquecimento do revestimento durante a sua fusão.

Os revestimentos fundidos com arco apresentaram uma diminuição mais acentuada no teor de Ni e um acréscimo sensível no teor de Fe dos revestimentos, ambos da ordem de 20% em relação ao pó, que não podem ser atribuídos a erros experimentais inerentes à análise. Uma variação deste nível no teor de ferro sugere fortemente fusão do substrato, isto é, diluição. Esta hipótese é ainda reforçada, se se considera que a temperatura da fonte de calor para fusão neste caso é bem mais elevada, da ordem de 6000°C e os resultados da análise por microscopia eletrônica de varredura e microsondagem da superfície de corpos de prova ensaiados à cavitação, discutida mais à frente.

Os espectros de difratometria de raios-X obtidos (figura 3.4.15) foram muito parecidos, indicando que não há variações estruturais muito significativas para a liga Ni-Cr-Si-Fe-B nas diversas condições pesquisadas, embora algumas raias específicas pudessem ser identificadas como Ni metálico, solução sólida CFC, intermetálico Ni-Fe-Cr ou, mais provavelmente solução sólida Ni-Fe-Cr com traços de Si (tabela 3.4.IX). Deve-se lembrar aqui que o níquel metálico e as soluções sólidas a base de Ni identificadas são todas estruturas cúbicas de face centrada (CFC) com parâmetros de rede muito próximos, o que está em perfeito acordo com os espectros mostrados na figura 3.4.15.

Sem ataque, a aparência dos revestimentos fundidos foi sempre uniforme, sem a indicação de precipitados. Os revestimentos fundidos com chama apresentaram um nível relativamente grande de porosidade aparente, como já discutido anteriormente, com poros pequenos e médios uniformemente espalhados ao longo da camada. Os revestimentos fundidos com arco, por sua vez, apresentaram poucos poros, mas de grande diâmetro (da ordem de 100-150 μm). Isto pode ser visto nas figuras 4.3.2 e 4.10.1, respectivamente.

A microestrutura predominante tanto em amostras fundidas com chama quanto com arco tem um aspecto dendrítico e é bifásica (figuras 3.4.16 e 3.4.17), com pequena variação de composição química entre as fases, possivelmente as que foram identificadas por raios-X como sendo solução sólida CFC e solução sólida Ni/Fe com traços de Cr e Si (Tabela 3.4.IX). Pequenas regiões com aparência e coloração diferentes das fases anteriores, também mostraram pequena variação de composição química em relação à austenita e à solução sólida

e não puderam ser caracterizadas como níquel metálico ou algum precipitado mais comum envolvendo Ni, Cr, Si ou Fe.

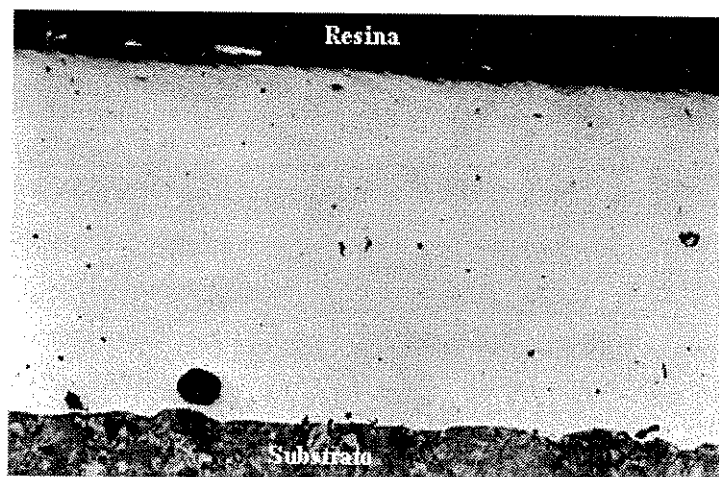


Fig. 4.10.1 - Seção transversal do revestimento fundido com TIG. Aumento: 100 X.

Se por um lado a análise química sugeria ocorrência de diluição na fusão com arco, a observação direta da seção transversal das amostras revestidas não sugeria a ocorrência de fusão deste, exceto em uma área específica. Os resultados do ensaio cavitacional também não mostram diferenças significativas de desempenho dos revestimentos fundidos com uma ou outra fonte de calor (figuras 4.3.2, 4.10.1 e 3.4.14). A figura 4.10.2 mostra a superfície cavitada das amostras fundidas com o arco elétrico e com chama.

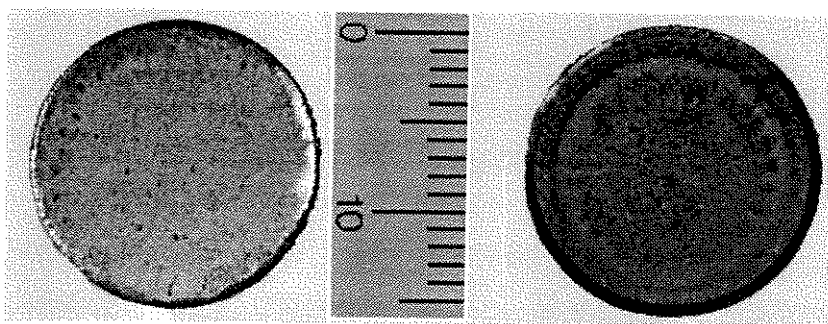


Fig. 4.10.2 - Superfície cavitada do revestimento fundido a arco e a chama, respectivamente. Lupa.

Observando com mais detalhe, notou-se que o aumento significativo do teor de ferro ocorria apenas em algumas regiões da seção transversal, ao longo do revestimento, independentemente de sua profundidade, em relação á superfície. Este resultado sugere que a

fusão do substrato ocorreu apenas em algumas regiões, possivelmente devida a variações dos parâmetros operacionais do arco durante a fusão, mais provavelmente da velocidade de deslocamento e/ou do comprimento do arco.

Embora o ensaio à cavitação destes revestimentos tenha apresentado uma perda de massa similar à dos revestimentos fundidos com chama (figura 3.4.14), poderia ter ocorrido uma erosão preferencial das regiões ricas em ferro, compensada por um desempenho melhor de outras regiões. Assim, foi feito um exame ao MEV da superfície de corpos de prova fundidos a arco submetidos ao ensaio de cavitação. O desgaste observado tinha a mesma aparência do observado em corpos de prova fundidos com chama e em CP's de aço carbono. Uma análise por EDS (Anexo 3) mostrou igualmente regiões mais e menos danificadas pela cavitação em áreas ricas em ferro, dependendo apenas de sua localização no corpo de prova.

Este resultado sugere até que, eventualmente, ligas com teor de Ni mais baixo, e portanto mais baratas, podem apresentar um bom desempenho quanto ao ataque cavitacional. A princípio, estas ligas não deveriam apresentar maiores problemas se fundidas com chama, mas cuidados especiais deveriam ser tomados para evitar diluição, no caso de fusão com arco.

Valores praticamente idênticos de microdureza Vickers foram medidos para os dois tipos de revestimentos fundidos. Já a dureza Rockwell C dos revestimentos fundidos com chama foi significativamente inferior à dos revestimentos fundidos com arco (tabela 3.4.VI). Isto pode ser explicado se se considerar a diferença de espessura destes. A dureza Rockwell C do revestimento fundido a arco está de acordo com os valores fornecidos pelo fabricante da liga. O valor da microdureza obtido nesta etapa é ligeiramente inferior ao obtido nos testes iniciais, mas ainda dentro da faixa de incerteza relacionada ao teste, e portanto não pode ser considerado como significativamente inferior.

O ensaio de tração mostrou que a adesão dos revestimentos ao substrato é excelente em ambos os casos (tabela 3.4.VII). Todos os corpos de prova testados se romperam através da camada de adesivo, que apresentou um desempenho de acordo com o esperado (da ordem de 30 MPa), como pode ser visto na seção 4.3 do Anexo 3.

4.11 - Conclusão

Com exceção da liga fundida após aspersão, o desempenho das ligas depositadas por aspersão térmica a chama foi inferior ao do aço carbono ABNT 1020, o que inviabiliza sua aplicação como camada protetora contra o dano causado pela cavitação.

Este péssimo desempenho parece ter sido causado pela estrutura lamelar dos revestimentos obtidos, que apresentava baixa aderência entre as lamelas. A baixa coesão observada parece um resultado intrínseco do processo, já que variações nos parâmetros de aspersão resultaram em alguma melhora, mas pouco significativa para a erosão causada pela cavitação.

O desempenho do revestimento frente ao dano cavitacional melhora sensivelmente, chegando a ficar comparável ao do aço inoxidável AISI 308 depositado por soldagem, quando se utiliza uma liga auto-fluxantes à base de níquel, com adições de Cr, Fe, Si e B, fundida pós-aspersão. A fusão após a aspersão destrói a estrutura lamelar, levando a uma estrutura mais fina, com aspecto dendrítico, que é mais acentuado quando uma fonte de calor mais intensa é utilizada para a fusão, como visto na figura 3.4.17.

Com tal desempenho, este tipo de revestimento já parece ficar competitivo com os atualmente usados na manutenção de usinas hidrelétricas. Contudo, devido ao porte dos equipamentos, a fusão por chama é impraticável. A utilização de um arco TIG nesta operação parece tornar o conjunto processo/consumível viável.

Entretanto, a operação de fusão do revestimento com arco mostrou-se delicada, pois pode influir significativamente na diluição e portanto na composição química local do revestimento final. Dentro dos limites obtidos, estas variações locais de composição por sua vez não influenciaram fortemente a microestrutura final nem o desempenho global do revestimento frente ao dano cavitacional, contribuindo para a viabilização da técnica na aplicação pretendida.

O processo TIG admite variações de parâmetros que tendem a minimizar a penetração e conseqüentemente a diluição, sem introduzir problemas sérios. Para uma aplicação mais segura deste processo na fusão de revestimentos depositados por aspensão térmica, um procedimento TIG otimizado poderia ser desenvolvido.

CONCLUSÕES E AVANÇOS ALCANÇADOS NO ASSUNTO

“Nada persiste, portanto nada merece apego.”

O trabalho realizado permitiu tirar conclusões sobre revestimentos depositados por aspersão térmica a chama e suas propriedades, sobre a influência destas na resistência dos depósitos ao dano cavitacional, sobre o ensaio acelerado de cavitação induzido por vibração ultra-sônica e sobre a aplicabilidade de revestimentos de ligas Ni-Cr-B fundidas pós-aspersão na prevenção do dano cavitacional a grandes turbinas hidráulicas utilizadas na geração de energia elétrica, que são:

- Os revestimentos depositados por aspersão térmica a chama apresentam uma estrutura lamelar típica com baixa coesão relativa entre as lamelas. Para alguns materiais, esta coesão pode ser variada, embora pouco, com mudanças nos parâmetros de operação, mas com pouco reflexo na resistência ao dano cavitacional, que é muito pequena.
- A perda de massa em ensaios de cavitação acelerada induzida por vibração ultra-sônica destes revestimentos, na condição como aspergidos, se dá por decoesão das lamelas entre si e fratura interlamelar, que conferem à superfície testada um aspecto de fratura frágil.
- Revestimentos auto-fluxantes do tipo Ni-Cr-Fe-Si-B-C (referidos como NiCrB no corpo do trabalho) aspergidos a chama e fundidos pós-aspersão apresentam boa resistência à erosão por cavitação, comparável à do aço inoxidável AISI 308. A utilização de chama ou arco elétrico na fusão posterior à aspersão não influi fortemente nesta resistência, embora variações na composição química e na estrutura de solidificação possam ocorrer.

- O ensaio de cavitação acelerada induzida por vibração ultra-sônica apresenta resultados bastante repetitivos e permite o estudo comparativo do desempenho de diferentes materiais e ligas quanto à resistência ao dano cavitacional.
- As partículas arrancadas neste ensaio de cavitação tendem a ser grosseiras para materiais pouco resistentes e mais finas para materiais mais resistentes. O método de preparação deste resíduo para observação ao microscópio influencia fortemente o resultado. A utilização de temperaturas elevadas nesta etapa é totalmente desaconselhada. A preparação por centrifugação em álcool seguida de vibração ultra-sônica e evaporação apresenta bons resultados.
- Revestimentos aspergidos por chama não apresentam tempo de incubação no ensaio acelerado de cavitação induzida por vibração. Este parâmetro é influenciado por pequenas variações nas condições superficiais das amostras testadas.
- Variações na rugosidade do substrato não necessariamente levam a variações na rugosidade do revestimento aspergido por chama. A rugosidade final parece depender de outros fatores como tamanho das partículas para aspersão e parâmetros de operação do processo.
- Revestimentos auto-fluxantes do tipo Ni-Cr-Fe-Si-B-C aspergidos a chama e fundidos com um arco TIG pós-aspersão apresentam potencial para serem utilizados na proteção de turbinas hidráulicas usadas na geração de energia elétrica. Esta técnica seria competitiva com revestimentos de aço inoxidável depositados por soldagem, com algumas vantagens em termos de espessuras depositadas e manutenção de perfis hidrodinâmicos.

Alguns avanços no conhecimento sobre os assuntos tratados foram obtidos. Algumas relações que eram apenas insinuadas na literatura foram melhor discutidas e apresentadas como fatos e tópicos inéditos foram apresentados, quais sejam:

- Mostrou-se claramente que revestimentos por aspersão térmica a chama não têm potencial como protetores contra o dano cavitacional, exceto os fundidos pós-aspersão.

- Os mecanismos de perda de massa para materiais pouco ou muito resistentes ao ataque cavitacional foram evidenciados
- Mostrou-se que a relação rugosidade do substrato/revestimento não é direta e depende de outros fatores.
- A utilização de um arco elétrico para fusão pós-aspersão térmica a chama é inédita e parece viabilizar a utilização deste tipo de revestimento a turbinas hidráulicas ou outros equipamentos de grande porte.
- O exame ao microscópio das partículas arrancadas no ensaio de cavitação acelerada também não é citado na literatura e mostrou-se um bom indicador do mecanismo de erosão por cavitação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

“Apesar de tão exíguos, temos em nós a vastidão.”

O trabalho realizado abriu perspectivas para novos estudos, particularmente quanto à possibilidade de aplicação da aspersão térmica a chama na proteção de turbinas hidráulicas contra a erosão por cavitação, principalmente:

- Estudo detalhado da fusão a arco de revestimentos depositados por aspersão térmica e suas conseqüências, explorando tópicos como, por exemplo: tipo e intensidade de corrente, polaridade, comprimento de arco, penetração e diluição;
- Avaliação do desempenho de outras ligas fusíveis pós-aspersão quanto à resistência ao dano cavitacional;
- Estudo quantitativo das relações entre rugosidade dos substrato, tamanho e distribuição das partículas do material aspergido e rugosidade do revestimento;
- Estudos comparativos da relação custo/benefício de revestimentos soldados e aspergidos;
- Avaliação da resistência à cavitação de revestimentos depositados por aspersão por chama a alta velocidade (HVOF) e a arco elétrico e, principalmente
- Teste de campo com a técnica sugerida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“O máximo que posso dar ao mundo é transformar-me a ponto de eficazmente o servir e mais intensamente o amar, sem no entanto a ele me render. É isto que o mundo me pede.”

- ABE, 1989 ABE, Y. Correlation between mechanical properties of material and damage by the vibratory cavitation test. **JSME International Journal**, v.32, n.4, p.558-566, 1989.
- ABNT NBR 6405 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR 6405, **Rugosidade das Superfícies**. Rio de Janeiro, 1988. 9p.
- AHMED, 1991a AHMED, S. M. et alli. Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion. **Wear**, v.142, p.303-314, 1991.
- AHMED, 1991b AHMED, S. M. et alli. SEM observation of the vibratory cavitation-fracture mode during the incubation period and small roughness effect. **JSME International Journal**, v.34, n.3, p.298-303, 1991.
- AKHTAR, 1982 AKHTAR, A. Plasma sprayed coatings for cavitation protection in hydraulic turbines. **Materials Performance**, p.15-18, aug. 1982.
- AKHTAR, 1986 AKHTAR, A. Materials technology for turbine performance. **Water Power & Dam Construction**, v.38, n.8, p.13-19, 1986.
- AKSENOV, 1992 AKSENOV, I. K. et alli. Strength of diamond-like carbon coatings under cavitation conditions. **Diamond and Related Materials**, v.1, p.549-552, 1992.
- ALCÂNTARA, 1991a ALCÂNTARA, N. G. et alli. Aspersão térmica de revestimentos cerâmicos - parte 1. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.3, p.40-44, 1991.

- ALCÂNTARA, 1991b ALCÂNTARA, N. G. et alli. Aspersão térmica de revestimentos cerâmicos - parte 2: características, propriedades e aplicações. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.4, p.41-47, 1991.
- ALFARO, 1993 ALFARO, S. C. A. et alli. The use of statistical modelling in welding. **Journal of Materials Science Technology**, v.38, p.399-406, 1993.
- AMBROZ, 1991 AMBROZ, O. e KASPAR, J. Physical-chemical changes in the deposit materials during plasma thermal spraying process. In: PLASMA TECHNIK SYMPOSIUM, 2, 1991. Lucerne. **Proceedings...** 1991. v.2, p.187-193.
- ARAÚJO, 1995 ARAÚJO, N. B. M. Contatos privados.
- ARAÚJO, 1996 ARAÚJO, N. B. M. et alli. Desgaste por cavitação de revestimentos soldados para turbinas hidráulicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 22, 1996, Blumenau. **Anais...**, 1996. São Paulo: ABS, 1996. p.
- ASAHI, 1976 ASAHI, N. et alli. Cavitation erosion properties of metal sprayed layers. International Thermal Spraying Conference, 8, 1976, Miami. **Proceedings...** 1976. p.259-263.
- ASM - AM&P, 1992 Characterizing thermal-spray coatings. **Advanced Materials & Processes**, v.141, n.5, p.23-27, 1992.
- ASTM C-633 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM C-633, **Standard test method for adhesion or cohesive strength of flame-sprayed coatings**. Philadelphia, 1974. 7p.
- ASTM E-18 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-18, **Standard test method for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness**. Philadelphia.
- ASTM E-140 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-140, **Standard hardness conversion tables for metals**. Philadelphia, 1984. 12p.
- ASTM E-384 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-384, **Test method for microhardness of materials**. Philadelphia.
- ASTM G-32 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM G-32, **Standard method of vibratory cavitation erosion test**. Philadelphia, 1985. 6p.

- AURET, 1993a AURET, J. G. et alli. Cavitation erosion of cooper and aluminum in water at elevated temperature. **Tribology International**, v.26, n.6, p.421-429, 1993.
- AURET, 1993b AURET, J. G. et alli. The influence of water air content on cavitation erosion in distilled water. **Tribology International**, v.26, n.6, p.431-433, 1993.
- AWS - WJ, 1992 Flame spray coatings help decrease maintenance costs. **Welding Journal**, v.71, n.11, p.54-55,1992.
- AWS, 1985 AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal Spraying - Prattice , theory, and applications**. Miami: AWS, 1985. 184p.
- B. C. HYDRO, 1987 B. C. HYDRO AND POWER AUTHORITY. **Alternative coatings for the protection of hydraulic turbines from cavitation erosion**. Report CEA No. 136 G 274. Surrey: B. C. Hidro, 1987. 70p.
- BERGMANN, 1994 BERGMANN, C. P. Influence on substrate roughness on the adherence of plasma sprayed ceramic coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.683-686.
- BISWAS, 1986 BISWAS, D. R. Deposition processes for films and coatings. **Journal of Materials Science**, v.21, p.2217-2223, 1986.
- BLANN, 1991 BLANN, G. A. Microetching techniques for revealing thermally sprayed coatings microstructures. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.175-186.
- BLOCK, 1992 BLOCK, G. et alli. Preparation of VPS and PVD coatings for metallographic and TEM investigations. **Mikrochimica Acta**, v.107, p.279-82, 1992.
- BLUNI, 1991 BLUNI, S. T. e MARDER, A. R. The use of quantitative image analysis for the characterization of a thermal spray coating. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.89-96.
- BRANDÃO, 1995 BRANDÃO, J. E. S. A. Contatos privados.

- BUTTON, 1994 BUTTON, S. T. Notas de aula da disciplina Tópicos em Engenharia de Materiais: Instrumentação e Planejamento Experimental, oferecida no 1º semestre de 1994, no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.
- CAMARGO, 1995 CAMARGO, F. Contatos privados.
- CHEN, 1991 CHEN, Y. L. e ISRAELACHVILI, J. New mechanism of cavitation damage. **Science**, v.252, p.1157-1160, 1991.
- CORRÊA, 1992 CORRÊA, E. S. (coord.) **Curso de Metodologia de Pesquisa - Planejamento de Experimentos**, 1992. APUD BUTTON, S. T. (Notas de aula da disciplina Tópicos em Engenharia de Materiais: Instrumentação e Planejamento Experimental, oferecida no 1º semestre de 1994, no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas).
- EISENBERG, 1966 EISENBERG, P., PREISER, H. S. e THIRUVENGADAM, A. On the mechanisms of cavitation damage and methods of protection. **Transactions Society Naval Architects**, p.241-286, dec. 1966.
- ENGELBERG, 1972 ENGELBERG, G. e YAHALOM, J. The corrosion factor in the cavitation of steel. **Corrosion Science**, v.12, p.469-472, 1972.
- FINCKE, 1994 FINCKE, J. R., SWANK, W. D. E HAGGARD, D. C. Comparison of the characteristics of HVOF and plasma thermal spray. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.325-330.
- FOWLER, 1990 FOWLER, D. B, RIGGS, W. e RUSS, J. C. Inspecting thermally sprayed coatings. **Advanced Materials & Processes**, v.138, n.5, p.41-52, 1990.
- FREITAS, 1995 FREITAS, M Q. e SANTOS, D. B. **Influência de revestimentos por aspersão térmica a chama sobre a resistência ao desgaste por cavitação**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 27p. Relatório final de iniciação científica.
- GÜLICH, 1987 GÜLICH, J. F. Calculation of metal loss under attack of erosion-corrosion or cavitation erosion. In: ADVANCES IN MATERIAL TECHNOLOGY FOR FOSSIL POWER PLANTS, 1987, Chicago. **Proceedings...** 1987. p.605-612.

- GUO, 1986 GUO, X., HERMAN, H. E RANGASWAMY, S. Cavitation erosion of plasma sprayed WC/ Co. *Advances in Thermal Spraying* 1986. p.37-46.
- HARRIS, 1983 HARRIS, P. e SMITH, B. L. Factorial techniques for weld quality production. **Metal Construction**, v.15, n.11, 1983. p. 661-666.
- HARVEY, 1995 HARVEY, D. The tough truth - wear resistant coatings using HVOF. **TWI Bulletin**, n.1, p.11-14, jan/feb. 1995.
- HERMAN, 1990 HERMAN, H. Advances in thermal-spray technology. **Advanced Materials & Processes**, v.137, n.4, p.41-45, 1990.
- HOWES Jr., 1994 HOWES Jr., C. P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. **Welding Journal**, v.73, n.4, p.47-51, 1994.
- HÜHNE, 1991 HÜHNE, H. e REBELLO, J. M. A. Resistência à cavitação de recobrimentos soldados. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.2, p.44-52, 1991.
- IRVING, 1993 IRVING, B.; KNIGHT, R. e SMITH, R. W. The HVOF process - the hottest topic in thermal spray industry. **Welding Journal**, v.72, n.7, p.25-30, 1993.
- IWAI, 1989 IWAI, Y., OKADA, T. e TANAKA, S. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 2: estimation of erosion from the distribution of bubble collapse pressures. **Wear**, v.133, p.233-243, 1989.
- IWAI, 1991 IWAI, Y., OKADA, T. e MORI, H. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 3: the results in a venturi facility. **Wear**, v.150, p.367-378, 1991.
- JOHNSON, 1990 JOHNSON, M. et alli. The resistance of nickel and iron aluminides to cavitation erosion and abrasive wear. **Wear**, v.140, p.279-289, 1990.
- JUN, 1993 JUN, W. et alli. Cavitation erosion of cobalt alloy coatings containing tungsten carbide particles in hydrochloric and sulfuric corrosive media. **Journal of Tribology**, v 115, p.285-288, 1993.
- KARIMI, 1986 KARIMI, A. e MARTIN, J. L. Cavitation erosion of materials. **International Metals Reviews**, v.31, n.1, p.1-26, 1986.
- KARIMI, 1989 KARIMI A. Cavitation erosion of austenitic stainless steel and effect of boron and nitrogen ion implantation. **Acta Metallurgica**, v.37, n.4, p.1079-1088, 1989.

- KEMPTON, 1991 KEMPTON, K. Where thermal spray coatings are most cost effective. **Welding Journal**, v.70, n.8, p.41-44, 1991.
- KNAPP, 1970 KNAPP, R. T., DAILY, J. W. e HAMITT, F. G. **Cavitation**. New York, Mc Graw-Hill, 1970. 578p.
- KREYE, 1994 KREYE, H., SZIGETI, F. e BUSCHINELLI, A. Proteção contra desgaste por revestimento com ligas auto-fluxantes de NiCrBSi. **Soldagem & Materiais** v.2, n.3, p.34-40 Arquivo Técnico, 1994.
- KUBEL Jr., 1990 KUBEL Jr., E. J. Powders dictate thermal spray-coating properties. **Advanced Materials & Processes**, v.138, n.6, p.34-32, 1990.
- LEISTNER, 1993 LEISTNER, E. Preparation and evaluation of thermal spray coatings. **Praktika Metallographika** v.30, n.9, p.428-440, 1993.
- LIMA, 1995 LIMA, M. M. Influência do tratamento térmico do metal duro depositado por spray térmico sob o aço. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 136 p. Tese (Mestrado).
- LIMA, 1986 LIMA, C. R. C. Tese doutorado Carlos Camello
- LUGSCHEIDER, 1991a LUGSCHEIDER, E. et alli. Application of two-level factor analysis to the optimization of thermal spray coatings using the example of plasma spraying. **Schweissen & Schneiden**, v.43, n.10, p.217-219, 1991.
- LUGSCHEIDER, 1991b LUGSCHEIDER, E. et alli. Quo vadis, thermal spray technology. **PMI**, v.23, n.1, p.33-39, 1991.
- MACINTYRE, 1983 MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara 2, 1983. 649p.
- MADADNIA, 1993 MADADNIA, J. e OWEN, I. Accelerated surface erosion by cavitating particulate-laden flows. **Wear**, v.165, p.113-116, 1993.
- MARANTZ, 1991 MARANTZ, D. R. e KOWALS, K. A. Wire arc plasma: a new contender in metal spraying. **Welding Journal**, v.70, n.8, p.46-50, 1991.

- MATEJKA, 1989 MATEJKA, D. e BENKO, B. **Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials**. Chichester: John Wiley & Sons, 1989. Cap. 5: Selection of powders for plasma spraying in industrial applications, p.126-148.
- MATHIAS, 1991 MATHIAS, M., GECKE, P. e POHL, M. The residual stress, texture and surface changes in steel induced by cavitation. **Wear**, v.150, p.11-20, 1991.
- MODENESI, 1990 MODENESI, P. J. **Statistical modelling of the narrow-gap metal arc welding process**. Bedford: School of Industrial Science of The Cranfield Institute of Technology, 1990. 308p. Thesis (Ph. D.).
- MODENESI, 1995 MODENESI, P. J. Contatos privados.
- NAGARAJAN, 1992 NAGARAJAN, R. Cavitation erosion of substrates in disk drive component cleaning: an exploratory study. **Wear**, v.152, p.75-89, 1992.
- NOVASKY, 1994 NOVASKY, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo: Ed. Edgar Blücher, 1994. p.55-65.
- OKADA, 1989 OKADA, T., IWAI, Y. e AWAZU, K. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 1: a method for measurement of collapse pressures. **Wear**, v.133, p.219-232, 1989.
- OKADA, 1990 OKADA, T. and IWAI, Y. Cavitation erosion. **JSME International Journal**, v.33, n.2, p.128-35, 1990.
- PALHAN, 1977 PALHAN, R. K. Effect of the stress level on the cavitation erosion rate. **Wear**, v.45, p.151-160, 1977.
- PEREIRA, 1995 PEREIRA, R. A. **Adaptação e avaliação de um equipamento para ensaio de cavitação acelerado**. Uberlândia: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da UFU, 1995. 141p. Dissertação (Mestrado).
- PROCOPIAK, 1994 PROCOPIAK, L., SINATORA, A. e BUSCHINELLI, A. Comportamento à erosão por cavitação de três revestimentos soldados de aços inoxidáveis. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 3. Fortaleza. **Anais...** p.167-180, out. 1994.

- RAABE, 1985 RAABE, J. **Hydro power - the design, use and function of hydromechanical, hydraulic and electrical equipment**. 1985. Cap. 5: Cavitation and water hammer as detrimental effects, p.270-93.
- RAO, 1977 RAO, B. C. S., RAO, N. S. L. e RAO, P. V. The role of incubation period in cavitation erosion. **Water Power & Dam Construction**, p.22-27, mar. 1977.
- RICHMAN, 1990 RICHMAN, R. H. e McNAUGHTON, W. P. Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals. **Wear**, v.140, p.63-82, 1990.
- RICHMAN, 1992 RICHMAN, R. H., RAO, A. S. e HODGSON, D. E.. Cavitation erosion of two NiTi alloys. **Wear**, v.157, p.401-407, 1992.
- SAMPSON, 1993 SAMPSON, E. Advances in thermal spray coatings broaden their applications. **Welding Journal**, v.72, n.7, p.39-41, 1993.
- SANTOS, 1995 SANTOS, M. A. **Avaliação preliminar do dano superficial causado por cavitação**. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 16p. Relatório final de iniciação científica.
- SMITH, 1991 SMITH, M. F. et alli. A comparison of techniques for the metallographic preparation of thermal sprayed coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.97-104.
- SMITH, 1994 SMITH, R. W. e FAST, R. D. The future of thermal spray technology. **Welding Journal**, v.73, n.7, p.43-50, 1994.
- SÓ, 1995 SÓ, S. M. M. **Caracterização estrutural de revestimentos depositados por soldagem resistentes à cavitação**. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 36p. Relatório final de iniciação científica.
- STARLING, 1994 STARLING, C. M. D. **Modelamento estatístico do processo GTAW narrow-gap com oscilação magnética do arco**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. 235p. Dissertação (Mestrado).
- STURGEON, 1994 STURGEON, A. Alumina coatings HVOF using hydrogen. **TWI Bulletin**, v.6, p. 136-138, nov/dec 1994.

- TAKEDA, 1993 TAKEDA, K. et alli. Erosion resistant coating by low pressure plasma spraying. **ISIJ International**, v.33, n.9, p.976-981, 1993.
- TELSONIC (sem data) TELSONIC AG. **Telsonic Manual**. (Manual do usuário do equipamento SG-22 1000 G, para ensaio de cavitação).
- THORPE, 1991 THORPE, M. L. Try thermal spray for specialty metal and carbide coatings. **Chemical Engineering Progress**, p.54-57, nov. 1991.
- THORPE, 1992 THORPE, M. L. Thermal spraying makes the grade as a repair process. **Welding Journal**, v.71, n.11, p.45-48, 1992.
- THORPE, 1993 THORPE, M. L. Thermal spray - industry in transition. **Advanced Materials & Processes**, v.143, n.5, p.50-61, 1993.
- TOMLINSON 1988 TOMLINSON, W. J., MOULE, R. T. e BLOUNT, G. N. Cavitation erosion of pure iron in distilled water containing chloride and chromates. **Tribology International**, v.21, n.1, p.21-25, 1988.
- TOMLINSON, 1989 TOMLINSON, W. J e Chapman, D. Effect of amplitude on the erosion and corrosion of cooper by 20 kHz ultrasound. **Wear**, v.130, p.381-384, 1989.
- TOMLINSON, 1991 TOMLINSON, W. J. e TALKS, M. G. Erosion and corrosion of cast iron under cavitation conditions. **Tribology International**, v.24, n.2, p.67-75, 1991.
- TULLIS, 1989 TULLIS, P. J. **Hydraulics of pipelines**. New York:, J. Wiley & Sons, 1989. p.119-166.
- VARACALLE Jr.,1991 VARACALLE Jr., D. J. e RIGGS II, W. L. Analytically modelling the plasma spray deposition of tribaloy 800. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.245-50.
- VARDELLE, 1994 VARDELLE, M. et alli. Dynamics of splat formation and solidification in thermal spraying process. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.555-62.
- VYAS, 1977 VYAS, B. e PREECE, C. M. Cavitation erosion of face centered cubic metals. **Metallurgical Transactions A**, v.8A, p.915-923, jun. 1987.

- VYAS, 1990 VYAS, B. e HANSSON, I. L. H. The cavitation erosion-corrosion of stainless steel. **Corrosion Science**, v.30 n.8,9, p.761-770, 1990.
- WANG, 1994 WANG, H. e PETRONE, S. Expert system for the plasma spray process. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.425-429.
- WU, 1994 WU, J. B. C. e REDMAN, J. E. Hardfacing with cobalt and nickel alloys. **Welding Journal**, v.73, n.9, p.63-68, 1994.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

“Dia de júbilo pode ser véspera de amargor, e vice-versa. Felizmente!!!”

- ABE, Y. Correlation between mechanical properties of material and damage by the vibratory cavitation test. **JSME International Journal**, v.32, n.4, p.558-566, 1989.
- AHMED, S. M. et alli. Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion. **Wear**, v.142, p.303-314, 1991.
- AHMED, S. M. et alli. SEM observation of the vibratory cavitation-fracture mode during the incubation period and small roughness effect. **JSME International Journal**, v.34, n.3, p.298-303, 1991.
- AKHTAR, A. Plasma sprayed coatings for cavitation protection in hydraulic turbines. **Materials Performance**, p.15-18, aug. 1982.
- AKHTAR, A. Materials technology for turbine performance. **Water Power & Dam Construction**, v.38, n.8, p.13-19, 1986.
- AKSENOV, I. K. et alli. Strength of diamond-like carbon coatings under cavitation conditions. **Diamond and Related Materials**, v.1, p.549-552, 1992.
- ALCÂNTARA, N. G. et alli. Aspersão térmica de revestimentos cerâmicos - parte 1. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.3, p.40-44, 1991.
- ALCÂNTARA, N. G. et alli. Aspersão térmica de revestimentos cerâmicos - parte 2: características, propriedades e aplicações. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.4, p.41-47, 1991.
- ALFARO, S. C. A. et alli. The use of statistical modelling in welding. **Journal of Materials Science Technology**, v.38, p.399-406, 1993.

- AMBROZ, O. e KASPAR, J. Physical-chemical changes in the deposit materials during plasma thermal spraying process. In: PLASMA TECHNIK SYMPOSIUM, 2, 1991. Lucerne. **Proceedings...** 1991. v.2, p.187-193.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Characterizing thermal-spray coatings. **Advanced Materials & Processes**, v.141, n.5, p.23-27, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM C-633, **Standard test method for adhesion or cohesive strength of flame-sprayed coatings**. Philadelphia, 1974. 7p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E 18, **Standard test method for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness**. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-140, **Standard hardness conversion tables for metals**. Philadelphia, 1984. 12p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E-384, **Test method for microhardness of materials**. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM G-32, **Standard method of vibratory cavitation erosion test**. Philadelphia, 1985. 6p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. Flame spray coatings help decrease maintenance costs. **Welding Journal**, V.71,N.11, P.54-55, 1992.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Thermal Spraying - Praticce , theory, and applications**. Miami: AWS, 1985. 184p.
- ARAÚJO, N. B. M. et alli. Desgaste por cavitação de revestimentos soldados para turbinas hidráulicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 22, 1996, Blumenau. **Anais...**, 1996. São Paulo: 1996, ABS. p.
- ASAHI, N. et alli. Cavitation erosion properties of metal sprayed layers. International Thermal Spraying Conference, 8, 1976, Miami. **Proceedings...** 1976. p.259-263.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR 6405, **Rugosidade das Superfícies**. Rio de Janeiro, 1988. 9p.
- AURET, J. G. et alli. Cavitation erosion of cooper and aluminum in water at elevated temperature. **Tribology International**, v.26, n.6, p.421-429, 1993.

- AURET, J. G. et alli. The influence of water air content on cavitation erosion in distilled water. **Tribology International**, v.26, n.6, p.431-433, 1993.
- B. C. HYDRO AND POWER AUTHORITY. **Alternative coatings for the protection of hydraulic turbines from cavitation erosion**. Report CEA No. 136 G 274. Surrey: B. C. Hidro, 1987. 70p.
- BARBEZAT, G., NICOLL, A. R. e SICKINGER, A. Abrasion, erosion and scuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications. **Wear**, v.162-164, p.529-537, 1993.
- BERGMANN, C. P. Influence on substrate roughness on the adherence of plasma sprayed ceramic coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.683-686.
- BIANCHI, L. et alli. Effect of particle velocity and substrate temperature on alumina and zirconia splat formation. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.569-574.
- BISWAS, D. R. Deposition processes for films and coatings. **Journal of Materials Science**, v.21, p.2217-2223, 1986.
- BLANN, G. A. Microetching techniques for revealing thermally sprayed coatings microstructures. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.175-186.
- BLOCK, G. et alli. Preparation of VPS and PVD coatings for metallographic and TEM investigations. **Mikrochimica Acta**, v.107, p.279-82, 1992.
- BLUNI, S. T. e MARDER, A. R. The use of quantitative image analysis for the characterization of a thermal spray coating. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.89-96.
- BUTTON, S. T. Notas de aula da disciplina Tópicos em Engenharia de Materiais: Instrumentação e Planejamento Experimental, oferecida no 1º semestre de 1994, no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.
- CHEN, Y. L. e ISRAELACHVILI, J. New mechanism of cavitation damage. **Science**, v.252, p.1157-1160, 1991.

- CORRÊA, E. S. (coord.) **Curso de Metodologia de Pesquisa - Planejamento de Experimentos**, 1992. APUD BUTTON, S. T. (Notas de aula da disciplina Tópicos em Engenharia de Materiais: Instrumentação e Planejamento Experimental, oferecida no 1º semestre de 1994, no Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas).
- EISENBERG, P., PREISER, H. S. e THIRUVENGADAM, A. On the mechanisms of cavitation damage and methods of protection. **Transactions Society Naval Architects**, p.241-286, dec. 1986.
- ENGELBERG, G. e YAHALOM, J. The corrosion factor in the cavitation of steel. **Corrosion Science**, v.12, p.469-472, 1972.
- FINCKE, J. R., Swank, W. D. e Haggard, D. C. Comparison of the characteristics of HVOF and plasma thermal spray. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.325-330.
- FOWLER, D. B., RIGGS, W. e RUSS, J. C. Inspecting thermally sprayed coatings. **Advanced Materials & Processes**, v.138, n.5, p.41-52, 1990.
- FREITAS, M. Q. e SANTOS, D. B. **Influência de revestimentos por aspersão térmica a chama sobre a resistência ao desgaste por cavitação**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 27p. Relatório final de iniciação científica.
- FUKANUMA, H. e OHMORI, A. Behavior of molten droplets impinging on flat surfaces. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.563-568.
- GLANCY, S. D. How metallographic preparation affects the microstructure of WC/Co thermal spray coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.771-777.
- GÜLICH, J. F. Calculation of metal loss under attack of erosion-corrosion or cavitation erosion. In: ADVANCES IN MATERIAL TECHNOLOGY FOR FOSSIL POWER PLANTS, 1987, Chicago. **Proceedings...** 1987. p.605-612.
- GUO, X., HERMAN, H. E RANGASWAMY, S. Cavitation erosion of plasma sprayed WC/ Co. **Advances in Thermal Spraying** 1986. p.37-46.
- HANSMA, P. K. et alli. Scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy: application to biology and technology. **Science**, v.242, p. 209-216, 1988.

- HARRIS, P. e SMITH, B. L. Factorial techniques for weld quality production. **Metal Construction**, v.15, n.11, 1983. p. 661-666.
- HARVEY, D. The tough truth - wear resistant coatings using HVOF. **TWI Bulletin**, n.1, p.11-14, 1995.
- HEATHCOCK, C. J., PROTHEROE, B. E. e BALL, A. Cavitation erosion of stainless steels. **Wear**, v.81, p.311-327, 1982.
- HERMAN, H. Advances in thermal-spray technology. **Advanced Materials & Processes**, p.41-45, apr. 1990.
- HOWES Jr., C. P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. **Welding Journal**, p.47-51, apr. 1994.
- HÜHNE, H. e REBELLO, J. M. A. Resistência à cavitação de recobrimentos soldados. **Soldagem & Materiais**, v.3, n.2, p.44-52, 1991.
- IRVING, B.; KNIGHT, R. e SMITH, R. W. The HVOF process - the hottest topic in thermal spray industry. **Welding Journal**, p.25-30, jul. 1993.
- IWAI, Y., OKADA, T. e TANAKA, S. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 2: estimation of erosion from the distribution of bubble collapse pressures. **Wear**, v.133, p.233-243, 1989.
- IWAI, Y., OKADA, T. e MORI, H. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 3: the results in a venturi facility. **Wear**, v.150, p.367-378, 1991.
- JOHNSON, M. et alli. The resistance of nickel and iron aluminides to cavitation erosion and abrasive wear. **Wear**, v.140, p.279-289, 1990.
- JUN, W. et alli. Cavitation erosion of cobalt alloy coatings containing tungsten carbide particles in hydrochloric and sulfuric corrosive media. **Journal of Tribology**, v 115, p.285-288, apr. 1993.
- KARIMI, A. e MARTIN, J. L. Cavitation erosion of materials. **International Metals Reviews**, v.31, n.1, p.1-26, 1986.
- KARIMI A. Cavitation erosion of austenitic stainless steel and effect of boron and nitrogen ion implantation. **Acta Metallurgica**, v.37, n.4, p.1079-1088, 1989.
- KARIMI, A., MAAMOURI, M. e MARTIN, J. L. Cavitation-erosion-induced microstructures in copper single-crystals. **Materials Science and Engineering**, v.A113, p.287-96, 1989.

- KARIMI, A. e MAAMOURI, M. Microscopic study of cavitation erosion behavior in cooper and Cu-5. 7wt.%Al single crystals. **Wear**, v.130, p.149-69, 1990.
- KEMPTON, K. Where thermal spray coatings are most cost effective. **Welding Journal**, v.70, n.8, p.41-44, 1991.
- KNAPP, R. T., DAILY, J. W. e HAMITT, F. G. **Cavitation**. New York, Mc Graw-Hill, 1970. 578p.
- KREYE, H., SZIGETI, F. e BUSCHINELLI, A. Proteção contra desgaste por revestimento com ligas auto-fluxantes de NiCrBSi. **Soldagem & Materiais** v.2, n.3, p.34-40 Arquivo Técnico, 1994.
- KUBEL Jr., E. J. Powders dictate thermal spray-coating properties. **Advanced Materials & Processes**, v.138, n.6, p.32-34, 1990.
- LEIGH, S. H et alli. Tensile adhesion testing of thermal spray coatings on flat surfaces. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.655-662.
- LEISTNER, E. Preparation and evaluation of thermal spray coatings. **Praktika Metallographika** v.30, n.9, p.428-440, 1993.
- LEVY, A. V. e CROOK, P. The erosion properties of alloys for the chemical processing industries. **Wear**, v.151, p.337-350, 1991.
- LIMA, M. M. Influência do tratamento térmico na aderência do metal depositado por spray térmico sob o aço. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 136p. Tese (Mestrado).
- LIMA, C. R. C. Tese doutorado Carlão.Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1996. Thesis (Doutorado).
- LUGSCHEIDER, E. et alli. Application of two-level factor analysis to the optimization of thermal spray coatings using the example of plasma spraying. **Schweissen & Schneiden**, v.43, n.10, p.217-219, 1991.
- LUGSCHEIDER, E. et alli. Quo vadis, thermal spray technology. **PMI**, v.23, n.1, p.33-39, 1991.
- MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara 2, 1983. 649p.
- MADADNIA, J. e OWEN, I. Accelerated surface erosion by cavitating particulate-laden flows. **Wear**, v.165, p.113-116, 1993.

- MARANTZ, D. R. e KOWALS, K. A. Wire arc plasma: a new contender in metal spraying. **Welding Journal**, v.70,n.8, p.46-50, 1991.
- MATEJKA, D. e BENKO, B. **Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials**. Chichester: John Wiley & Sons, 1989. Cap. 5: Selection of powders for plasma spraying in industrial applications, p.126-148.
- MATHIAS, M., GECKE, P. e POHL, M. The residual stress, texture and surface changes in steel induced by cavitation. **Wear**, v.150, p.11-20, 1991.
- MODENESI, P. J. **Statistical modelling of the narrow-gap metal arc welding process**. Bedford: School of Industrial Science of The Cranfield Institute of Technology, 1990. 308p. Thesis (Ph. D.).
- NAGARAJAN, R. Cavitation erosion of substrates in disk drive component cleaning: an exploratory study. **Wear**, v.152, p.75-89, 1992.
- NAKAGAWA, P. M, KAWAKAMI, F. e KUDOH, T. Trends in automotive applications of thermal spray technology in japan. **TWI Bulletin**, p.1-6, jun 1994.
- NICOLL, A. R. Production plasma spraying in the automotive industry: a european viewpoint. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.7-17.
- NOVASKY, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo: Ed. Edgar Blücher, 1994. p.55-65.
- OKADA, T., IWAI, Y. e AWAZU, K. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion. Part 1: a method for measurement of collapse pressures. **Wear**, v.133, p.219-232, 1989.
- OKADA, T. and IWAI, Y. Cavitation erosion. **JSME International Journal**, v.33, n.2, p.128-35, 1990.
- PALHAN, R. K. Effect of the stress level on the cavitation erosion rate. **Wear**, v.45, p.151-160, 1977.
- PAWLOWSKI, L. e FAUCHAIS, P. Thermal transport properties of thermally sprayed coatings. **International Materials Review**, v.37, n.6, p.271-289, 1992.
- PEREIRA, R. A. **Adaptação e avaliação de um equipamento para ensaio de cavitação acelerado**. Uberlândia: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da UFU, 1995. 141p. Dissertação (Mestrado).

- PHILLIPS, R. W. Atomic force microscopy for thin film analysis. **Surface and Coatings Technology**, v.68/69, p.770-775, 1994.
- PROCOPIAK, L., SINATORA, A. e BUSCHINELLI, A. Comportamento à erosão por cavitação de três revestimentos soldados de aços inoxidáveis. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 3. Fortaleza. **Anais...** p.167-180, out. 1994.
- RAABE, J. **Hydro power - the design, use and function of hydromechanical, hydraulic and electrical equipment**. 1985. Cap. 5: Cavitation and water hammer as detrimental effects, p.270-93.
- RAO, B. C. S., RAO, N. S. L. e RAO, P. V. The role of incubation period in cavitation erosion. **Water Power & Dam Construction**, p.22-27, mar. 1977.
- REVEL, P. et alli. Mechanical properties and microstructural evolution of a cobalt base alloy coating. **Materials Science and Engineering**, v.A169, p.85-92, 1993.
- RICHMAN, R. H. e McNAUGHTON, W. P. Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals. **Wear**, v.140, p.63-82, 1990.
- RICHMAN, R. H., RAO, A. S. e HODGSON, D. E.. Cavitation erosion of two NiTi alloys. **Wear**, v.157, p.401-407, 1992.
- SAMPSON, E. Advances in thermal spray coatings broaden their applications. **Welding Journal**, v.72, n.7, p.39-41, 1993.
- SANTOS, M. A. **Avaliação preliminar do dano superficial causado por cavitação**. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 16p. Relatório final de iniciação científica.
- SEXMITH, M and TROCZYNSKI, T. The variations in coating properties across a spray pattern. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.751-757.
- SHAH, R. et alli. Towards manufacturing high-quality thermal spray coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.675-81.
- SIITONEN, P., KONOS, T. e KETTUNEN, P. O. Corrosion properties of stainless steel coatings made by different methods of thermal spraying. In: NATIONAL THERMAL SPRAYING CONFERENCE, 7, 1994, Boston. **1994 Thermal Spray Industrial Applications**. Metals Park: ASM International, 1994. p.105-10.

- SMITH, M. F. et alli. A comparison of techniques for the metallographic preparation of thermal sprayed coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.97-104.
- SMITH, R. W. e FAST, R. D. The future of thermal spray technology. **Welding Journal**, v.73, n.7, p.43-50, j1994.
- SÓ, S. M. M. **Caracterização estrutural de revestimentos depositados por soldagem resistentes à cavitação**. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 36p. Relatório final de iniciação científica.
- STARLING, C. M. D. **Modelamento estatístico do processo GTAW narrow-gap com oscilação magnética do arco**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. 235p. Dissertação (Mestrado)
- STURGEON, A. Alumina coatings HVOF using hydrogen. **TWI Bulletin**, v.6, p. 136-138, nov/dec 1994.
- TAKEDA, K. et alli. Erosion resistant coating by low pressure plasma spraying. **ISIJ International**, v.33, n.9, p.976-981, 1993.
- TELSONIC AG. **Telsonic Manual**. (Manual do usuário do equipamento SG-22 1000 G, para ensaio de cavitação).
- THORPE, M. L. Try thermal spray for specialty metal and carbide coatings. **Chemical Engineering Progress**, p.54-57, nov. 1991.
- THORPE, M. L. Thermal spraying makes the grade as a repair process. **Welding Journal**, v.71,n.11, p.45-48, 1992.
- THORPE, M. L. Thermal spray - industry in transition. **Advanced Materials & Processes**, v.143, n.5, p.50-61, 1993.
- TOMLINSON, W. J., MOULE, R. T. e BLOUNT, G. N. Cavitation erosion of pure iron in distilled water containing chloride and chromates. **Tribology International**, v.21, n.1, p.21-25, 1988.
- TOMLINSON, W. J e CHAPMAN, D. Effect of amplitude on the erosion and corrosion of copper by 20 kHz ultrasound. **Wear**, v.130, p.381-384, 1989.
- TOMLINSON, W. J. e TALKS, M. G. Erosion and corrosion of cast iron under cavitation conditions. **Tribology International**, v.24, n.2, p.67-75, 1991.
- TOTEMEIER, T. C., GALE, W. F. e KING, J. E. Microstructural changes in MCrAlY coatings on nickel-base superalloy single crystals. In: Thermal Spraying Conference, 1993, Aachen. **Proceedings...** p.304-307

TULLIS, P. J. **Hydraulics of pipelines**. New York: J. Wiley & Sons, 1989. p.119-166.

VARACALLE Jr., D. J. e RIGGS II, W. L. Analytically modelling the plasma spray deposition of triballoy 800. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.245-50.

VARDELLE, M. et alli. Dynamics of splat formation and solidification in thermal spraying process. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.555-62.

VYAS, B. e PREECE, C. M. Cavitation erosion of face centered cubic metals. **Metallurgical Transactions A**, v.8A, p.915-923, jun. 1987.

VYAS, B. e HANSSON, I. L. H. The cavitation erosion-corrosion of stainless steel. **Corrosion Science**, v.30 n.8,9, p.761-770, 1990.

WANG, H. e PETRONE, S. Expert system for the plasma spray process. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 4, 1991, Pittsburgh. **Proceedings...** Metals Park: ASM International, 1991. p.425-429.

WANG, J. et alli. Use of scanning tunneling microscopy in metalography. **Materials Characterization**, v.33, p.168-174, 1994.

WU, J. B. C. e REDMAN, J. E. Hardfacing with cobalt and nickel alloys. **Welding Journal**, v.73, n.9, p.63-68, 1994.

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA ASPERSÃO, SEGUNDO OS FORNECEDORES

1) Alumina-Titânia -pó Metco 130 BZ (Metco Technical Bulletin, sep. 77)

É um material cerâmico que produz um revestimento extremamente resistente ao desgaste e admite excelente acabamento. Possui alta resistência elétrica, pode trabalhar a temperatura ambiente de até 540 °C e resiste à maioria dos ácidos e álcalis. O revestimento depositado é bastante denso, apresentando pouca porosidade na faixa de espessura de 0,25 a 0,28 mm. A aderência do revestimento é elevada e a ligação entre as lamelas é também bastante forte.

Características típicas do pó:

composição típica: 13% dióxido de titânio, balanço de óxido de alumínio.

tamanho típico: -53 a +15 µm (-270 mesh a +15 µm)

temperatura de fusão: 1840 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 60 HRc

microdureza HV 300: 850

densidade: 3,5 g/cm³

porosidade: desprezível

resistência de adesão: 15,51 MPa

espessura máxima: 0,5 a 0,6 mm

Recomendações para aplicação

pré-aquecimento: 95 a 120 °C

temperatura interpasses: >95 °C

o revestimento deve permanecer preto durante a aplicação
manter a tocha perpendicular à superfície do substrato

2) Óxido de Cromo - pó Metco 106 (Metco Technical Bulletin, mar. 81.)

Material cerâmico que produz um revestimento resistente ao desgaste abrasivo e erosão por partículas, denso e de dureza elevada, para serviço em temperaturas até 540 °C. É insolúvel em ácidos, álcalis e álcool. Bastante utilizado na indústria têxtil.

Características típicas do pó:

composição típica: 96% óxido de cromo, 2% dióxido de titânio, balanço de outros óxidos

tamanho típico: -90 a +15 µm (-170 mesh a +15 µm)

temperatura de fusão: 2435 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 65 HRc

microdureza HV 300: 900-1200

densidade: 4,8 g/cm³

porosidade: 5% vol.

resistência de adesão: 27,57 MPa

espessura máxima: 1,3 mm

Recomendações para aplicação

pré-aquecimento: 90 a 120 °C

temperatura interpasses: <200 °C

manter a distância de aplicação correta

velocidade de aplicação da ordem de 7,6 m/min

o óxido de cromo é tóxico, utilizar “EPI” adequado.

3) Liga NiCrMoAl - pó Metco 442 (Metco Technical Bulletin, mar. 80.)

Liga especialmente desenvolvida para produzir um material inoxidável, duro, com boa resistência ao desgaste, à oxidação e à corrosão, sem necessidade de aplicação de um material de base sobre o substrato, para aumentar a adesão. Indicado para temperatura de serviço até 760 °C.

Características típicas do pó:

composição típica: 8,5%Cr; 7%Al; 5%Mo; 2%Si; 2%Fe; 2%B; 3%dióxido de titânio; Ni
balanço

tamanho típico: -125 a +45 µm (-120 a + 325 mesh)

temperatura de fusão: 660 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 30-35 HRc

microdureza HV 300: 450

densidade: 6,5-6,7 g/cm³

porosidade: 2% vol.

teor de óxidos: 5-15% vol.

resistência de adesão: 28-35 MPa

espessura máxima: 2,5 a 6,0 mm

Recomendações para aplicação

pré-aquecimento: 90 a 120 °C

temperatura interpasses: <230 °C. Se esta atingir 750 °C, a dureza sobe para 39 HRc, melhorando também a resistência à corrosão e oxidação

4) Liga NiCrBFeSiC - pó Metco 12C (Metco Technical Bulletin, jun. 72.)

É uma liga auto-fluxante que produz revestimentos usináveis, fundidos pós-aspersão, para serviço a temperaturas até 800 °C, densos e praticamente isentos de porosidade.

Características típicas do pó:

composição típica: 10%Cr; 2,5%B; 2,5%Fe; 2,5%Si; 0,15%C; Ni balanço

tamanho típico: -125 a +45 μm (-120 a +325 mesh)

temperatura de fusão: 1010-1065 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 30-35 HRc

densidade: 8,2 g/cm³

porosidade: nenhuma

resistência de adesão: excelente

espessura máxima: 1,3-1,8 mm

Recomendações para aplicação:

Nenhuma recomendação especial para aspersão. Para fusão pós-aspersão, recomenda-se: uso de chama ligeiramente redutora, pré-aquecimento da região próxima a uma temperatura entre 315 e 540 °C, não superaquecer a região fundida, resfriamento lento pós-fusão.

5) Aço Inoxidável Austenítico - pó Metco 41 C (Metco Technical Bulletin, sep. 77.)

Produz um revestimento similar ao aço inoxidável AISI 316, brilhante, denso e resistente à corrosão e ao desgaste, facilmente usinável, próprio para temperaturas de serviço até 540 °C.

Características típicas do pó:

composição típica: 17%Cr; 12%Ni; 2,5%Mo; 1,0%Si; 0,1%C; Fe balanço

tamanho típico: -106 a +45 μm

temperatura de fusão: 1370 - 1400 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 80 HRb

densidade: 6,5 g/cm³

espessura máxima: 1,3 a 1,9 mm

Recomendações para aplicação

pré-aquecimento: 90 a 120 °C

temperatura interpasses: <200 °C

Aplicar selante após aplicação, particularmente se o substrato não for resistente à corrosão.

6) Bronze-Alumínio - Arame Metco Sprabronze AA (Metco Technical Bulletin)

Características típicas do arame:

composição típica: 90%Cu; 9% Al; 1%Fe

diâmetro típico: 3,2 mm

temperatura de fusão: 880 - 1040 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 82 HRb

espessura máxima: 1,3 a 1,9 mm

Recomendações para aplicação

pré-aquecimento: 90 - 120 °C

temperatura interpasses: 200 °C máx.

7) Aço Inoxidável Martensítico - Arame Metcoloy 2 (Metco Technical Bulletin)

Características típicas do arame:

composição típica: 13%Cr; 0,5%Ni; 0,5%Mn; 0,5%Si; 0,35%C; 0,02%P; 0,02%S; Fe balanço

diâmetro típico: 3,2 mm

temperatura de fusão: ~1420 °C

Características típicas do revestimento:

dureza: 33 HRC

densidade: 6,74 g/cm³

CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE REVESTIMENTO

1 - Testes iniciais

Equipamentos Usados:

Para pós: Tocha TeroDyn 2000 com bicos RL 200 e 210, e regulador/indicador de vazão, Eutetic.

Para arames: Tocha 12 E, com regulador/indicador de vazão, Metco.

1.1 - *Aplicação da camada de material base (ligação): A partir do pó Metco 450:* Vazão de gases: Acetileno: 75, Oxigênio: 35 (em unidades do equipamento); Pressão de ar comprimido: 1 bar ($\approx 14,7$ psi); Bico RL 210 - Distância de aplicação: 120-150 mm. *A partir do arame Metco 405:* Vazão de gases: Acetileno: 39, Oxigênio: 44 (em unidades do equipamento); Pressão de ar comprimido: 4,6 bar (≈ 70 psi); Distância de aplicação: 10-15 cm.

1.2 - *Aplicação do pó Metco 130 BZ.* Vazão de gases: Acetileno: 60, Oxigênio: 38; Pressão de ar comprimido: 3 bar (≈ 45 psi), Bico RL 210, Válvula T ajustada em 13, Distância de aplicação: 75-90 mm, Termopar colocado num corpo de prova não usinado.

1ª camada: base, 3 demãos. Temperatura inicial ≈ 60 °C; Temperatura final ≈ 80 °C.

2ª camada: revestimento, 14 demãos. Temperatura inicial ≈ 65 °C; Temperatura final ≈ 85 °C.

3ª camada: revestimento, 12 demãos. Temperatura inicial ≈ 68 °C; Temperatura final ≈ 90 °C.

Espessuras medidas: base: 0,18 mm, revestimento: 0,38 mm.

1.3 - *Aplicação do pó Metco 106.* Vazão de gases: Acetileno: 60, Oxigênio: 38; Pressão de ar comprimido: 3 bar (≈ 45 psi), Bico RL 210, Válvula T ajustada em 12, Distância de aplicação: 75-90 mm, Termopar colocado num corpo de prova não usinado.

1ª camada: base, 3 demãos. Temperatura inicial ≈ 52 °C; Temperatura final ≈ 82 °C.

2ª camada: revestimento, 12 demãos. Temperatura inicial ≈ 65 °C; Temperatura final ≈ 82 °C.

3ª camada: revestimento, 16 demãos. Temperatura inicial $\approx 70^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 90^{\circ}\text{C}$.
 4ª camada: revestimento, 14 demãos. Temperatura inicial $\approx 81^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 100^{\circ}\text{C}$.
 5ª camada: revestimento, 14 demãos. Temperatura inicial $\approx 76^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 98^{\circ}\text{C}$.
 6ª camada: revestimento, 14 demãos. Temperatura inicial $\approx 74^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 104^{\circ}\text{C}$.
 7ª camada: revestimento, 14 demãos. Temperatura inicial $\approx 79^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 103^{\circ}\text{C}$.
 Espessuras medidas: base: 0,13 mm, revestimento: 0,13 mm.

1.4 - *Aplicação do pó Metco 442*. Vazão de gases: Acetileno: 75, Oxigênio: 35; Pressão de ar comprimido: 2 bar (≈ 30 psi), Bico RL 200, Válvula T ajustada em 15, Distância de aplicação: 75-90 mm Termopar colocado num corpo de prova usinado.

1ª camada: base, 4 demãos. Temperatura inicial $\approx 74^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 104^{\circ}\text{C}$.
 2ª camada: revestimento, 11 demãos. Temperatura inicial $\approx 90^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 142^{\circ}\text{C}$.
 3ª camada: revestimento, 6 demãos. Temperatura inicial $\approx 77^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 108^{\circ}\text{C}$.
 Espessuras medidas: base: 0,13 mm, revestimento: 0,34 mm.

1.5 - *Aplicação do pó Metco 442, sem camada base*. Vazão de gases: Acetileno: 75, Oxigênio: 35; Pressão de ar comprimido: 2 bar (≈ 30 psi), Bico RL 200, Válvula T ajustada em 15, Distância de aplicação: 75-90 mm.

1ª camada: revestimento, 10 demãos.
 3ª camada: revestimento, 11 demãos.
 Espessura medida: 0,36 mm.

1.6 - *Aplicação do pó Metco 41 C*. Vazão de gases: Acetileno: 75, Oxigênio: 35; Pressão de ar comprimido: 2 bar (≈ 30 psi), Bico RL 200, Válvula T ajustada em 15, Distância de aplicação: 75-90 mm. Termopar colocado num corpo de prova usinado.

1ª camada: base, 6 demãos. Temperatura inicial $\approx 74^{\circ}\text{C}$; Temperatura final $\approx 104^{\circ}\text{C}$.
 2ª camada: revestimento, 10 demãos.
 Espessuras medidas: base: 0,12 mm, revestimento: 0,33 mm.

1.7 - *Aplicação do pó Metco 12 C, sem camada base.* Vazão de gases: Acetileno: 48, Oxigênio: 30; Pressão de ar comprimido: 2,6 bar ($\approx$ 40 psi), Bico RL 200, Válvula T ajustada em 17, Distância de aplicação: 75-90 mm. Termopar colocado num corpo de prova não usinado.

1ª camada: revestimento, 6 demãos. Temperatura inicial $\approx$ 78 °C; Temperatura final $\approx$ 125 °C.

2ª camada: revestimento, 5 demãos. Temperatura inicial $\approx$ 100 °C; Temperatura final $\approx$ 130°C.

Espessura medida: 0,29 mm.

Fusão: Tocha de soldagem oxi-acetilênica, chama ligeiramente carburante, distância de aproximadamente 10 cm durante aquecimento. Temperatura máxima atingida: 900 °C.

1.8 - *Aplicação do pó Metco 12 C, sem camada base e sem fusão.* Vazão de gases: Acetileno: 48, Oxigênio: 3; Pressão de ar comprimido: 2,6 bar ($\approx$ 40 psi), Bico RL 200, Válvula T ajustada em 17, Distância de aplicação: 75-90 mm.

1ª camada: revestimento, 6 demãos.

Espessura medida: 0,30 mm.

1.9 - *Aplicação do arame Sprabronze AA.* Vazão de gases: Acetileno: 40, Oxigênio: 44; Pressão de ar comprimido: 4,6 bar ($\approx$ 70 psi), Distância de aplicação: 100-150 mm.

1ª camada: base, 4 demãos.

2ª camada: revestimento, 14 demãos.

3ª camada: revestimento, 14 demãos.

Espessuras medidas: base: 0,13 mm, revestimento: 0,69 mm.

1.10 - *Aplicação do arame Metcoloy 2.* Vazão de gases: Acetileno: 40, Oxigênio: 44; Pressão de ar comprimido: 4,6 bar ($\approx$ 70 psi), Distância de aplicação: 100-150 mm.

1ª camada: base, 4 demãos.

2ª camada: revestimento, 2 demãos.

3ª camada: revestimento, 18 demãos.

4ª camada: revestimento, 8 demãos.

Espessuras medidas: base: 0,12 mm, revestimento: 0,58 mm.

1.11 - *Aplicação do cordão de Óxido de Cromo*. Vazão de gases: Acetileno: 47, Oxigênio: 47; Pressão de ar comprimido: 3,5 bar ($\approx$ 50 psi), Distância de aplicação: 55-60 mm.

1ª camada: base, 4 demãos (arame).

2ª camada: revestimento, 34 demãos.

3ª camada: revestimento, 30 demãos.

4ª camada: revestimento, 8 demãos.

Espessuras medidas: base: 0,07 mm, revestimento: 0,16 mm.

2 - Variação nos parâmetros operacionais de revestimento

Equipamentos Usados:

Tocha 12 E, com regulador/indicador de vazão, Metco.

2.1 - *Aplicação da camada de material base (ligação) a partir do pó Eutetic 21021*: Vazão de gases: Acetileno: 75, Oxigênio: 35 (em unidades do equipamento); Pressão de ar comprimido: 1 bar ($\approx$ 14,7 psi); Bico RL 210- Distância de aplicação: 120-150 mm.

2.2 - *Aplicação dos arames Sprabronze AA e Metcoloy 2*. Condição N: Vazão de gases: Acetileno: 40, Oxigênio: 44; Pressão de ar comprimido: 4,6 bar ($\approx$ 70 psi), Condição G: Vazão de gases: Acetileno: 45, Oxigênio: 45; Pressão de ar comprimido: 4,6 bar ($\approx$ 70 psi), Condição A: Vazão de gases: Acetileno: 40, Oxigênio: 44; Pressão de ar comprimido: 5,7 bar ($\approx$ 85 psi), Condição T: Vazão de gases: Acetileno: 44, Oxigênio: 44; Pressão de ar comprimido: 5,7 bar ($\approx$ 85 psi). Distância de aplicação: 100-150 mm.

3 - Revestimentos fundidos

Equipamentos usados: Tocha TeroDyn 2000

Fonte TIG com controle eletrônico, tocha TIG com eletrodo de tungstênio com 2% Thória, diâmetro de 1,2 mm.

Aplicação do pó Metco 12 C: Vazão de gases: Acetileno: 48, Oxigênio: 30; Pressão de ar comprimido: 2,6 bar ($\approx$ 40 psi), Bico RL 210, Válvula T ajustada em 24, Distância de aplicação: 150 - 170 mm.

Fusão: Tocha de soldagem oxi-acetilênica, chama ligeiramente carburante, distância de aproximadamente 10 cm durante aquecimento, 1 cm durante a fusão. Tocha Tig, corrente contínua, eletrodo positivo, corrente entre 40 e 60 A, comprimento de arco 2 mm.

Anexo 3

RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS**1 - Seleção das Ligas****1.1 - Medidas de Rugosidade**

Rugosidade Ra - ISO - Cutoff 0,8 mm									
Calibração com Padrão 2,95 µm									
Aparelho Mitutoyo Surftest 211 - Jateamento com alumina									
C. P.	Medida						Média	D.P.	C.V.
	1	2	3	4	5	6			
STD	2,95	2,95	2,95	2,95			2,95	0,00	0,00
3	12,07	9,72	9,42	12,09	10,95	10,97	10,87	1,13	10,38
6	11,47	11,14	12,35	9,85	11,35	9,81	11,00	0,99	9,03
9	17,98	16,18	17,96	16,94	14,96	17,97	17,00	1,24	7,28
12	20,40	23,17	20,59	21,02	21,71	23,35	21,71	1,29	5,92
15	24,05	22,49	19,60	21,05	23,66	23,30	22,36	1,72	7,69
18	6,01	6,96	7,66	5,44	5,76	4,63	6,08	1,09	17,86
21	18,28	17,24	20,47	21,47	17,66	20,50	19,27	1,76	9,13
24	14,40	15,60	13,35	13,75	11,49	12,45	13,51	1,45	10,70
27	16,54	19,19	16,80	14,42	16,96	15,66	16,59	1,58	9,53
30	10,03	11,50	10,29	10,84	11,40	11,06	10,85	0,59	5,46
J1	8,19	8,78	8,63	10,39	9,33	9,21	9,08	0,76	8,38
J2	6,95	7,62	7,75	7,95	6,94	7,67	7,53	0,46	6,11
STD	2,94	2,97	2,96	2,95	2,95	2,95	2,95	0,01	0,35

Coeficiente de Variação(CV) = Desvio Padrão(DP) / Média x 100%

STD - Padrão Mitutoyo

Rugosidade Ra, ISO, Cutoff 2,5 mm									
Calibração com Padrão 2,95 μm									
Aparelho Mitutoyo Surftest 211 - Jateamento com alumina									
C. P.	Medida						Média	D.P.	C.V.
	1	2	3	4	5	6			
Ar	0,08	0,10	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07	0,02	20,22
2	8,53	6,96	9,39	7,91	7,47	8,13	8,06	0,85	10,48
5	6,76	8,69	8,25	7,97	9,50	8,73	8,32	0,92	11,10
8	12,78	12,19	18,59	13,57	19,59	11,08	14,63	3,56	24,33
11	19,95	26,62	17,96	16,02	19,20	15,15	19,15	4,09	21,36
14	19,70	17,55	15,83	18,47	17,22	17,84	17,77	1,29	7,27
17	2,53	2,23	3,56	2,22	3,26	2,85	2,77	0,55	19,88
20	17,82	18,18	20,88	16,86	16,43	15,62	17,63	1,84	10,45
23	7,86	6,32	7,30	10,35	9,71	11,22	8,79	1,92	21,80
26	9,75	9,75	9,50	14,28	10,49	11,98	10,96	1,86	17,00
29	7,54	7,56	7,31	11,14	8,65	7,41	8,27	1,49	18,00
Linha	8,69	8,49	8,51	8,83	8,51	8,42	8,57	0,15	1,19

Ar - Apalpador não apoiado,

Linha - Apalpamento repetido sobre uma mesma linha do C.P. 2

Rugosidade Ra, ISO, Cutoff 0,8 mm									
Calibração com Padrão 2,95 μm									
Aparelho Mitutoyo Surftest 211 - Jateamento com areia									
C. P.	Medida						Média	D.P.	C.V.
	1	2	3	4	5	6			
31	1,75	2,10	2,00	2,02	1,82	1,67	1,89	0,17	8,99
32	1,86	1,93	1,83	1,74	2,13	1,56	1,84	0,19	10,32
33	1,82	1,95	1,92	1,65	1,53	2,01	1,81	0,19	10,49
Cutoff 2,5									
33	2,71	2,45	2,20	1,74	2,41	1,69	2,20	0,41	18,6

Rugosidade Ra, ISO, Cutoff 2,5 mm Calibração com Padrão 2,95 µm Aparelho Mitutoyo Surftest 211 - Jateamento com areia																			
		Medidas																	
C.P.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Média
34 (3)	11,74	11,33	11,77	10,55	11,45	10,28	11,06	11,88	10,21	10,70	11,69	9,45	9,83	11,33	12,50				11,05
35 (6)	12,41	10,42	10,83	10,64	9,99	11,07													10,89
36 (9) *	22,39	14,85	15,81	16,62	16,97	14,50	12,75	12,53	14	18,62	13,76	13,96							15,56
37 (15)	19,05	13,34	15,38	16,05	17,10	15,13	17,25	18,61	17,63	16,64	16,21	18,69	19,11	17,03	18,75	15,30	17,40	13,98	16,81
38 (24)	16,43	13,32	15,31	14,10	17,48	13,83	15,10	19,21	16,73	16,43	15,46	17,02							15,87
39 (27)	15,52	13,20	14,90	15,83	13,74	12,87	16,61	15,10	14,40	16,21	13,35								14,70
40 (30)	17,20	15,80	14,58	16,45	15,93	14,77													15,79
																			0,99
																			6,30

(entre parênteses): CP de condição equivalente na primeira série. * Cutoff de 0,8 mm

1.2 - Medidas de Dureza

Dureza Rockwell C, carga de 62,5 kg (de acordo com a ASTM E-18)								
C. P.	Medida					Média	D.P.	C.V.
	1	2	3	4	5			
2	55,20	71,80	63,70	72,00	70,05	66,55	7,18	10,80
5	41,70	54,60	51,25	39,00	46,30	46,57	6,47	13,89
8	49,00	54,70	62,00	50,80	56,00	54,50	5,06	9,29
11	67,30	63,30	68,00	58,40	66,30	64,66	3,93	6,08
14	52,00	55,80	67,50	62,70	65,20	60,64	6,52	10,76
17	64,20	61,00	68,00	65,00	69,00	65,44	3,19	4,87
20	65,80	78,00	58,80	58,00	71,00	66,32	8,43	12,71
23	44,80	46,00	51,80	45,00	49,30	47,38	3,06	6,46
26	63,80	69,70	69,00	71,20	63,20	67,38	3,64	5,40
29	66,00	64,60	65,50	62,10	68,80	65,40	2,42	3,70

Dureza Superficial Rockwell C, carga de 15 kg (de acordo com a ASTM E-18)								
C. P.	Medida					Média	D.P.	C.V.
	1	2	3	4	5			
3	89,00	84,00	89,00	--	--	87,33	2,89	3,31
6	67,00	44,00	70,00	58,00	67,00	61,20	10,62	17,35
9	65,00	66,00	81,00	72,00	66,00	70,00	6,75	9,64
12	73,00	67,00	72,00	--	--	70,67	3,21	4,55
15	50,50	57,50	47,50	--	--	51,83	5,13	9,90
18	77,00	75,00	77,00	--	--	76,33	1,15	1,51
21	76,00	64,50	73,00	74,00	--	71,88	5,07	7,06
24	60,00	54,00	67,00	52,00	66,00	59,80	6,80	11,37
27	72,00	75,00	74,50	72,00	--	73,38	1,60	2,18
30	60,00	84,00	57,00	86,00	83,00	74,00	14,23	19,23

Microdureza Vickers com carga de 500g (de acordo com a norma ASTM E-384)									
C. P.	Parâmetro	Medida					Média	D.P.	C.V.
		1	2	3	4	5			
1	d1	37,1	34,9	34,4	34,5	35,4			
	d2	33,2	34,2	30,4	33,8	33,3			
	dmédio	35,2	34,6	32,4	34,1	34,4			
	HV	750,3	776,6	883,1	794,9	785,6	798,1	50,3	6,3
4	d1	48,4	44,2	47,6	48,9	42,2			
	d2	51,4	43,8	46,7	43,3	46,3			
	dmédio	49,9	44,0	47,2	46,1	44,3			
	HV	372,3	478,8	417,0	436,2	473,4	435,5	43,7	10,0

continua...

...continuação

Microdureza Vickers com carga de 500g (de acordo com a norma ASTM E-384)									
7	d1	97,1	91,5	85,3	81,0	120,0			
	d2	90,0	100,0	76,0	86,3	115,0			
	dmédio	93,5	95,8	80,7	83,7	117,5			
	HV	105,9	101,1	142,5	132,5	67,1	109,8	29,7	27,1
10	d1	53,8	47,9	38,2	50,3	41,1			
	d2	47,8	46,7	39,8	50,0	45,1			
	dmédio	50,8	47,3	39,0	50,1	43,1			
	HV	359,2	414,3	609,5	368,6	499,0	450,1	104,9	23,3
13	d1	40,9	47,2	38,7	44,2	50,0			
	d2	40,9	49,5	39,3	38,2	47,7			
	dmédio	40,9	48,4	39,0	41,2	48,9			
	HV	554,2	396,5	609,5	546,1	388,5	498,9	100,2	20,1
16	d1	42,3	39,7	43,3	39,6	43,2			
	d2	43,0	40,6	45,1	41,5	43,2			
	dmédio	42,6	40,2	44,2	40,6	43,2			
	HV	509,6	575,1	474,5	563,8	496,7	523,9	43,6	8,3
19	d1	39,2	40,0	46,1	40,1	39,4			
	d2	40,2	41,2	50,0	43,5	40,4			
	dmédio	39,7	40,6	48,0	41,8	39,9			
	HV	588,2	562,4	401,5	530,6	582,3	533,0	76,9	14,4
22	d1	70,4	72,1	70,2	71,7	73,1			
	d2	68,4	75,0	68,2	72,6	75,0			
	dmédio	69,4	73,5	69,2	72,2	74,0			
	HV	192,5	171,4	193,6	178,1	169,1	180,9	11,6	6,4
25	d1	45,9	58,1	50,0	51,7	47,4			
	d2	42,4	53,3	54,7	48,6	46,4			
	dmédio	44,1	55,7	52,4	50,2	46,9			
	HV	475,6	298,8	338,3	368,6	421,4	380,5	69,5	18,3
28	d1	36,8	32,5	37,0	35,8	34,7			
	d2	49,7	37,5	40,2	35,6	35,4			
	dmédio	43,3	35,0	38,6	35,7	35,1			
	HV	495,6	756,7	622,2	727,3	754,6	671,3	112,6	16,8
Região da base do CP4	d1	65,6	73,2	76,2	81,9	87,4			
	d2	63,3	74,8	72,6	75,0	85,2			
	dmédio	64,5	74,0	74,4	78,5	86,3			
	HV	223,2	169,3	167,5	150,6	124,5	167,0	36,2	21,7

d1, d2 - Medidas das diagonais, dmédio - diagonal média, HV - Microdureza Vickers

1.3 - Ensaios de Cavitação

Condições de ensaio: Frequência: 20 MHz, Amplitude: 44,9 μ m, Temperatura: 20 ± 2 °C
Imersão em 1l de água destilada

Cabeçalho das Tabelas: material do revestimento, identificação da amostra: (CP ##), data do ensaio e diâmetro do CP: (do substrato/do revestimento)

Aço Carbono Jateado					CP J1				CP J2			
10/10/95 - Diâmetro do CP = 16,04 mm					17/10/95 - Diâmetro do CP = 16,19 mm							
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)				
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0				
2	10	6,4	0,32	6,4	15	6,3	0,21	6,3				
3	20	5,0	0,57	11,4	30	4,5	0,36	10,8				
4	30	4,4	0,47	15,8	45	6,0	0,35	16,8				
5	40	4,1	0,43	19,9	60	5,0	0,37	21,8				
6	50	3,4	0,38	23,3	75	6,9	0,40	28,7				
7	60	4,8	0,41	28,1	90	6,2	0,44	34,9				
8	70	2,8	0,38	30,9	105	7,0	0,44	41,9				
9	80	6,1	0,45	37,0	120	7,2	0,47	49,1				
10	90	2,9	0,45	39,9	135	7,8	0,50	56,9				
11	100	6,9	0,49	46,8	150	6,7	0,48	63,6				
12	110	2,0	0,45	48,8	165	7,4	0,71	71,0				
13	120	2,7	0,24	51,5	170	7,6	0,75	78,6				
14	130	5,3	0,40	56,8	185	7,9	0,78	86,5				
15	140	5,0	0,41	61,8	190	6,5	0,72	93,0				
16	155	7,3	0,47	69,1	205	7,4	0,49	100,4				
17	166	6,9	0,54	76,0								
18	181	8,1	0,50	84,1								
19	196	7,1	0,76	91,2								
20	201	7,5	1,50	98,7								

Alumina/Titânia - P6 130			CP A		CP B			
24/10/95 - Diâmetro do CP = 16,25/61 mm					11/12/95 - Diâmetro do CP = 16,10/46 mm			
Ordem	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado
	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	23,0	1,15	23,0	10	5,7	0,29	5,7
3	20	5,0	1,40	28,0	20	18,9	1,23	24,6
4	30	14,0	0,95	42,0	30	23,2	2,11	47,8
5	40	15,8	1,49	57,8	40	20,7	2,20	68,5

continua...

...continuação

6	50	14,7	1,53	72,5	50	14,5	1,76	83,0
7	60	12,8	1,38	85,3	60	13,4*	1,34	96,4
8	70	12,8	1,28	98,1				
9	80	10,3	1,16	108,4				
10	90	11,4	1,14	119,8				

* Revestimento parcialmente removido e substrato parcialmente exposto. Ensaio interrompido.

Óxido de Cromo - Pó 106 CP C					CP D			
13/12/95 - Diâmetro do CP = 16,10/27 mm					14/12/95 - Diâmetro do CP = 16,10/28 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0		0,0	0	0,0		
2	10	134,5*		134,5	10	117,9*		117,9

* Revestimento completamente removido. Ensaio interrompido.

Liga NiCrAl - c/ base - Pó 442 CP E					CP F			
12/12/95 - Diâmetro do CP = 16,15/37 mm					21/12/95 Diâmetro do CP = 16,05/18 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	50,8	2,54	50,8	10	39,4	1,97	39,4
3	20	19,6	3,52	70,4	20	11,4	2,54	50,8
4	30	14,1	1,69	84,5	30	9,9	1,07	60,7
5	40	9,6	1,19	94,1	40	8,8	0,94	69,5
6	50	7,2	0,84	101,3	50	8,7	0,88	78,2
7	60	9,4	0,83	110,7	60	0,6	0,47	78,8
8	70	6,2	0,78	116,9	70	6,1	0,34	84,9
9	80	8,6	0,74	125,5	80	6,6	0,65	91,7
10	90	7,0	0,78	132,5	90	4,8	0,58	96,5
11	100	6,7	0,69	139,2	100	0,6	0,27	97,1
12	110	13,5*	1,35	152,7	110	4,3	0,25	101,4
13					120	5,9	0,51	107,3
14					130	4,9	0,54	112,2
15					140	0,5	0,27	112,7
16					150	5,0	0,50	117,7

* Aparentemente soltou um pedaço. Ensaio interrompido.

Liga NiCrAl - s/ base - Pó 442 CP G					CP H			
18/12/95 - Diâmetro do CP = 15,90/16,24 mm					06/03/96 - Diâmetro do CP = 16,00/00 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	33,5	1,68	33,5	10	44,5	2,23	44,5
3	20	15,5	2,45	49,0	20	17,7	3,11	62,2
4	30	12,6	1,41	61,6	30	14,9	1,63	77,1
5	40	10,4	1,15	72,0	40	15,3	1,51	92,4

continua...

...continuação

6	50	9,8	1,01	81,8	50	11,9	1,36	104,3
7	60	10,3	1,01	92,1	60	13,1	1,00	117,4
8	70	9,5	0,99	101,6	75	18,7	1,06	136,1
9	80	9,4	0,94	111,0	90	11,2	0,78	147,3

Aço Inox. AISI 316 - Pó 41C CP I					CP J			
14/11/95 - Diâmetro do CP = 16,00/36 mm					14/11/95 - Diâmetro do CP = 16,10/24 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	49,1	2,46	49,1	10	54,4	2,72	54,4
3	20	45,0	4,71	94,1	20	38,2	4,63	92,6
4	30	36,2	4,06	130,3	30	27,9	3,31	120,5
5	40	20,7	2,85	151,0	40	23,4	2,57	143,9
6	50	17,6*	1,76	168,6	50	18,7*	1,87	162,6

* Aparentemente o revestimento furou. Ensaio interrompido.

Liga NiCrB - fundida - Pó 12C CP K					CPL			
03/11/95 - Diâmetro do CP = 16,10/18 mm					09/01/96 - Diâmetro do CP = 16,30/15 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	1,0	0,05	1,0	10	0,9	0,05	0,9
3	20	0,6	0,08	1,6	20	0,5	0,07	1,4
4	30	0,5	0,06	2,1	30	1,7	0,11	3,1
5	40	0,4	0,03	2,5	40	1,8	0,18	4,9
6	60	1,0	0,04	3,5	50	1,6	0,17	6,5
7	80	2,2	0,08	5,7	60	0,7	0,12	7,2
8	100	1,1	0,08	6,8	70	1,2	0,10	8,4
9	120	1,6	0,07	8,4	80	1,0	0,07	9,4
10	140	1,6	0,08	10,0	100	2,0	0,08	11,4
11	160	1,3	0,07	11,3	120	1,8	0,10	13,2
12	180	1,4	0,07	12,7	140	2,7	0,11	15,9
13	200	2,4	0,10	15,1	160	2,1	0,12	18,0
14	220	1,3	0,09	16,4	180	2,7	0,12	20,7
15	240	1,5	0,07	17,9	200	3,4	0,10	23,1
16	260	1,3	0,06	19,2	230	3,8	0,10	26,9
17	290	2,5	0,06	21,7	260	3,4	0,12	30,3
18	320	3,3	0,10	25,0	290	3,8	0,12	30,1
19	350	1,7	0,08	26,7	320	3,3	0,11	37,4
20	380	2,3	0,07	29,0	350	3,5	0,13	40,9
21	410	2,6	0,08	31,6	380	4,1	0,12	45,0
22	440	2,7	0,09	34,3	410	2,8	0,10	47,8
23	470	2,8	0,09	37,1	440	3,3	0,11	51,1
24	500	2,6	0,09	39,7	470	3,3	0,07	54,4
25	530	2,2	0,05	41,9	500	2,9	0,07	57,3

continua...

...continuação

26	590	5,0	0,06	46,9	560	6,9	0,08	64,2
27	650	5,7	0,09	52,6	620	6,6	0,11	70,8
28	710	4,6	0,09	57,2	680	6,6	0,11	77,4
29	770	4,7	0,08	61,9				

Liga NiCrB-sem fundir-Pó 12C					CP M		CP N		
04/01/96 - Diâmetro do CP = 16,20/27 mm									
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	
1	0	0	0	0					
2	10	13,9*	1,39	13,9	Amostra não ensaiada.				
3	20	453,3**	--	467,2	Condição de pouco interesse.				

* Formou-se um furo no centro do revestimento.

** O revestimento se soltou. Ensaio interrompido.

Bronze-alumínio - Arame CP O					CP P			
11/03/96 - Diâmetro do CP = 16,20/33 mm					27/10/95 - Diâmetro do CP = 16,20/47 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	22,1	1,11	22,1	10	36,0	1,80	36,0
3	20	28,4	2,53	50,5	20	19,0	2,75	55,0
4	30	15,0	2,17	65,5	30	18,9	1,90	73,9
5	40	16,0	1,55	81,5	40	16,4	1,77	90,3
6	50	12,0	1,40	93,5	50	14,0	1,52	104,3
7	60	12,7	1,24	106,2	60	13,2	1,36	117,5
8	70	11,7	0,81	117,9	70	12,5	1,29	130,0
9	90	16,4	0,70	134,3	80	15,5	1,40	145,5
10	110	15,0	0,79	149,3	90	8,4	1,20	153,9
11	130	15,9	0,70	162,2	100	5,9	0,72	159,8
12	150	9,9	0,57	172,1	110	7,3	0,66	167,1
13	170	7,5	0,38	179,6	120	6,9	0,71	174,0
14					130	4,6	0,58	178,6
15					140	6,5	0,56	185,1
16					150	4,6	0,46	189,7

Aço Inox. AISI 420 - Arame					CP R			
21/11/95 - Diâmetro do CP = 16,10/39 mm								
Ordem	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado
	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)
1	0	0,0						
2	10	12,7	0,64	12,7				
3	20	5,5	0,91	18,2				
4	30	6,1	0,58	24,3	Amostra não ensaiada. Foram ensaiadas outras equivalentes			
5	40	3,7	0,49	28,0				
6	50	8,5	0,61	36,5				

continua...

...continuação

7	60	4,9	0,54	41,4
8	75	7,2	0,40	48,6
9	90	9,3	0,55	57,9
10	105	4,6	0,46	62,5
11	120	6,0	0,35	68,5
12	135	6,3	0,41	74,8
13	150	6,9	0,44	81,7
14	165	5,0	0,40	86,7
15	180	6,0	0,31	92,7
16	200	3,3	0,23	96,0
17	220	6,4	0,24	102,4
18	240	7,7	0,35	110,1
19	260	4,8	0,31	114,9
20	280	2,8	0,19	117,7
21	300	8,5	0,23	126,2
22	330	4,0	0,21	130,2
23	360	5,5	0,16	135,7
24	390	4,6	0,15	140,3

Óxido de Cromo - Cordão					CP T			
26/10/95 - Diâmetro do CP = 16,05/26 mm					03/11/95 - Diâmetro do CP = 16,10/18 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0			0	0,0		
2	10	7,8	0,39	7,8	4	5,4	0,38	5,4
3	20	11,2	0,95	19,0	14	10,8	0,81	16,2
4	30	13,6	1,24	32,6	24	12,8	1,18	29,0
5	40	15,0	1,43	47,6	34	16,1	1,45	45,1
6	50	13,3	1,42	60,9	44	14,8*	1,48	59,9
7	60	13,3*	1,28	60,9				

* Aparentemente o revestimento furou. Ensaio interrompido.

Aço Carbono Asperg. - Pó 448					CP AC2			
18/12/95 - Diâmetro do CP = 16,15/34 mm					04/03/96 - Diâmetro do CP = 16,00/05 mm			
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0
2	10	12,6	0,63	12,6	10	55,1	2,78	55,1
3	20	170,1*	17,01	182,7	20	23,4	3,93	78,5
4					30	18,6	2,10	97,1
5					40	16,4	1,75	113,5
6					50	12,7	1,50	126,2
7					60	11,3**	1,13	137,5

* O revestimento soltou. Ensaio interrompido.

** Aparentemente o revestimento furou. Ensaio interrompido.

2 - Variação nos Parâmetros de Aspersão

2.1 - Medidas de Rugosidade

Rugosidade Ra ISO Cutoff 2,5 mm															
Calibração com Padrão 2,95 µm															
Aparelho Mitutoyo Surftest 311 - Jateamento com alumina															
C.P.	Medidas												Media	D.P.	C.V.
n=5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
24	11,99	12,84	14,81	15,03	9,44	14,36							13,08	2,14	16,37
BG	15,17	16,23	21,15	16,38	14,02	17,42							16,73	2,46	14,68
BT	14,47	14,12	15,72	17,58	14,36	12,14							14,73	1,81	12,29
BN	20,31	18,83	17,51	17,1	20,11	23,51							19,56	2,33	11,94
BA	14,86	17,3	16,32	14,97	18,05	15,61							16,19	1,29	7,96
n=1															
AG	16,72	19,9	22,14	17,96	14,6	17,41	17,15	16,58	12,92				17,26	2,69	15,59
AT	22,64	21,43	22,41	13,32	17,52	20,75	13,63	20,39	14,07	20,35	13,89		18,22	3,8	20,87
AN	18,92	19,43	18,84	19,62	18,12	18,61	17,13	18,34	14,66	22,74	12,99	21,11	18,38	2,6	14,13
AA	23,86	14,29	14,18	15,79	13,46	15,3	16,74	16,73	18,55	20,55			16,95	3,24	19,11

2.2 - Ensaio de Adesão (tração)

C.P.	Tensão de Ruptura (MPa)	Local de Ruptura
AA	23,3	Através do revestimento
AG	24,6	Através do revestimento
AT	22,9	Através do revestimento
AN	21,3	Através do revestimento
BA	9,1	Através do revestimento
BG	9,7	Através do revestimento
BT	11,9	Através do revestimento
BN	9,2	Através do revestimento

2.3 - Ensaios de Cavitação

Condições de ensaio: Frequência: 20 MHz, Amplitude: 44,9 μ m, Temperatura: 20 ± 2 °C

Cabeçalho das Tabelas: material do revestimento, identificação da amostra: (CP ##), data do ensaio e diâmetro do CP: (do substrato/do revestimento)

Aço Inox 420 (Metcoloy 2)					CP AG				CP AT			
18/01/96 Diâmetro do CP = 16,10/22 mm					25/01/96 Diâmetro do CP = 15,90/90 mm							
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)				
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,00	0,0	0,0				
2	10	12,4	0,62	12,4	10	12,30	0,602	12,3				
3	20	10,0	1,12	22,4	20	7,40	0,99	19,7				
4	30	4,1	0,71	26,5	30	5,60	0,65	25,3				
5	40	6,3	0,52	32,8	40	5,50	0,56	30,8				
6	50	3,8	0,51	36,6	50	4,00	0,48	34,8				
7	60	6,6	0,52	43,2	60	2,80	0,34	37,6				
8	70	5,0	0,58	48,2	70	4,70	0,38	42,3				
9	80	4,0	0,45	52,2	80	5,70	0,35	48,0				
10	90	4,7	0,44	56,9	100	8,60	0,36	56,6				
11	100	4,6	0,47	61,5	120	8,10	0,42	64,7				
12	110	3,1	0,26	64,6	140	9,10	0,43	73,8				
13	130	9,5	0,32	74,1	160	6,40	0,39	80,2				
14	150	6,0	0,39	80,1	180	7,80	0,36	88,0				
15	170	6,7	0,34	86,8	200	9,90	0,50	97,9				

Bronze-alumínio - Sprabronze					CP BA				CP BT			
30/01/96 Diâmetro do CP = 16,10/26 mm					08/02/96 Diâmetro do CP = 16,00/30 mm							
Ordem	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado	Tempo	Variação	Taxa	Acumulado				
	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)	(min)	(mg)	(mg/min)	(mg)				
1	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0				
2	10	18,5	0,93	18,5	10	16,3	0,82	16,3				
3	20	10,8	1,40	29,3	20	10,6	1,35	26,9				
4	30	9,7	0,98	39,0	30	10,3	1,05	37,2				
5	40	2,0	0,59	41,0	40	10,1	1,02	47,3				
6	50	1,2	0,16	42,2	50	10,3	1,02	57,6				
7	60	9,5	0,54	51,7	60	8,9	0,96	66,5				
8	70	8,0	0,91	60,3	70	8,5	0,87	75,0				
9	80	8,4	0,57	68,7	80	8,1	0,83	83,1				
10	100	14,2	0,57	82,9	90	5,2	0,44	88,3				
11	120	14,5	0,72	97,4	110	15,4	0,52	103,7				

continua...

...continuação

12	140	12,1	0,67	109,5	130	12,1	0,60	115,8
13	160	10,1	0,56	119,6	150	11,0	0,58	126,8
14	180	8,8	0,47	128,4	170	8,9	0,17	135,7
15	200	8,5	0,43	136,9	190	8,4	0,43	144,1
16	220	9,6	0,36	146,5	210	8,6	0,34	152,7
17	250	10,6	0,35	157,1	240	8,8	0,29	161,5
18					270	8,1	0,27	169,6

3. Influência da Condição Superficial no Ensaio de Cavitação

3.1 - Medidas de Rugosidade

Medidas de Rugosidades - Aço Carbono - Ra, n=5, cutoff = 2,5 mm Aparelho Mitutoyo 311									
Amostra	Medidas								
	1	2	3	4	5	6	Média	D.P.	C.V.
Polida	0.10	0.10	0.15	0.10	0.08	0.09	0.10	0.02	23.44
Usinada	5.57	5.80	5.91	5.40	4.87	5.15	5.45	0.39	7.24

Medidas de Rugosidades - Aço Carbono - Ra, n=5, cutoff = 0,8 mm Aparelho Mitutoyo 311									
Amostra	Medidas								
	1	2	3	4	5	6	Média	D.P.	C.V.
Polida	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.00	7.90
Usinada	3.21	3.58	3.27	3.01	3.23	3.49	3.30	0.21	6.25

Medidas de Rugosidades - Aço Carbono - Ra, n=5, cutoff = 0,25 mm Aparelho Mitutoyo 311									
Amostra	Medidas								
	1	2	3	4	5	6	Média	D.P.	C.V.
Polida	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
Usinada	1.48	1.41	1.33	1.58	1.72	1.90	1.57	0.21	13.45

3.2 - Ensaio de Cavitação

Aço carbono polido					CP P1				CP P2			
24/04/96 Diâmetro do CP = 16,10 mm					25/04/96 - Diâmetro do CP = 16,05 mm							
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0				
2	10	0,2	0,01	0,2	10	0,3	0,02	0,3				
3	20	0,2	0,02	0,4	20	0,3	0,03	0,6				
4	30	0,1	0,02	0,50	30	0,2	0,03	0,8				
5	40	0,8	0,05	1,3	40	1,4	0,08	2,2				
6	50	2,8	0,18	4,1	50	1,9	0,17	4,1				
7	60	2,8	0,28	6,9	60	3,1	0,25	7,2				
8	70	4,3	0,36	11,2	70	3,9	0,23	11,1				
9	80	4,0	0,42	15,2	90	9,4	0,33	20,5				
10	90	5,1	0,46	20,3	110	9,5	0,47	30,0				
11	100	3,9	0,45	24,2	130	9,8	0,39	39,8				
12	110	4,0	0,40	28,2	160	13,7	0,46	53,5				
13	120	5,2	0,23	33,4								
14	150	13,0	0,30	46,4								
15	180	13,7	0,45	60,1								
16	210	12,8	0,44	72,9								
17	240	13,3	0,44	86,2								
18	270	13,8	0,45	100,0								
19	300	13,0	0,45	113,0								
20	330	12,9	0,43	125,9								
21	360	14,4	0,48	140,3								

Aço carbono usinado			CP U1	
22/02/96 - Diâmetro do CP = 16 mm				
Ordem	Tempo (min)	Variação (mg)	Taxa (mg/min)	Acumulado (mg)
1	0	0,0	0,00	0,0
2	10	1,6	0,08	1,6
3	20	2,0	0,18	3,6
4	30	2,0	0,20	5,6
5	40	2,9	0,25	8,5
6	50	4,2	0,36	12,7
7	60	3,8	0,27	16,5
8	80	9,0	0,32	25,5
9	100	8,3	0,43	33,8
10	120	8,4	0,42	42,2
11	140	9,5	0,36	51,7
12	170	16,5	0,55	68,2

4. Ensaaios com Revestimentos Fundidos

4.1 - Medidas de Espessura

Espessura medida (mm)				
Medida	1	2	3	Média
Fusão				
A chama	0,407	0,331	0,365	0,368
A arco	0,485	0,406	0,505	0,465

4.2 - Medidas de Dureza

Medidas de microdureza Vickers HRV 500g (conforme ASTM E-384)						
Fusão	Medida	D1	D2	D _{médio}	HV	Média
A chama	1	41,8	43,2	42,5	513,0	491,5 ± 29,5
	2	45,7	43,9	44,8	461,7	
	3	44,7	44,9	44,8	461,7	
	4	44,1	43,9	44,0	478,6	
	5	44,4	42,6	43,5	489,7	
	6	43,6	43,3	43,4	490,8	
	7	42,3	40,2	41,2	544,6	
	8	43,6	43,0	43,3	491,5	
A arco	1	40,0	39,6	39,8	585,0	497,6 ± 63,4
	2	40,0	40,6	40,3	570,6	
	3	41,7	41,6	41,6	534,2	
	4	44,6	44,0	44,3	472,2	
	5	42,7	42,7	42,7	513,0	
	6	47,4	47,4	47,4	412,4	
	7	46,6	46,2	46,4	430,4	
	8	44,2	45,3	44,6	462,7	

Medidas de dureza Rockwell C 150 kg (conforme ASTM E-18)									
CP	1	2	3	4	5	6	Média	DP	C.V.
Chama	23	24	27	25	23	26	24,7	1,6	6,6
Arco	33	33	36	37	42	36	36,2	3,3	9,1

4.5 - Resultados das Análises por EDS

4.5.1 - Amostra fundida com chama (Ver figuras 3.4.16 e 3.4.17)

Região	Si	Cr	Fe	Ni
Fase Escura 1	2,41	9,91	2,78	84,91
Fase Escura 2	3,28	9,14	2,71	84,87
Fase Escura 3	0,51	10,34	2,22	86,93
Média	2,07	9,80	2,57	85,57
Fase Clara 1	4,69	11,39	3,36	80,55
Fase Clara 2	4,06	12,28	2,93	80,73
Fase Clara 3	4,28	12,36	3,12	80,24
Média	4,34	12,01	3,14	80,51
Nód. Claros 1	2,78	14,65	2,21	80,35
Nód. Claros 2	2,19	13,99	1,99	81,83
Média	2,49	14,32	2,10	81,09

4.5.2 - Amostra fundida com arco (Ver figuras 3.4.16 e 3.4.17)

Região	Si	Cr	Fe	Ni
Fase Escura 1	2,45	11,18	13,65	72,72
Fase Escura 2	4,15	13,14	12,02	70,66
Média	3,30	12,16	12,84	71,69
Fase Clara 1	3,15	9,77	15,96	71,13
Fase Clara 2	3,05	9,82	17,24	69,89
Média	3,10	9,80	16,60	70,51
Nód. Claros 1	0,58	17,43	1,77	80,21
Nód. Claros 2	3,24	14,75	1,93	80,08
Média	1,91	16,09	1,85	80,15
Geral 1	3,41	10,64	13,21	72,74
Geral 2	2,33	10,72	15,39	71,56
Geral 3	4,66	11,24	26,17	57,93
Geral 4	2,69	8,97	36,27	52,06
Geral 5	2,77	9,20	31,24	56,79
Geral 6	4,24	10,35	24,95	60,46
Média	3,35	10,19	24,54	61,92

(ver seção 4.10)

Região	Si	Cr	Fe	Ni
Maior desgaste 1	4,7	11,2	26,2	57,9
Maior desgaste 2	2,7	9,0	36,3	52,0
Média	3,7	10,1	31,3	54,9
Menor desgaste 1	2,3	10,7	15,4	71,6
Menor desgaste 2	2,8	9,2	31,2	56,8
Média	2,6	9,9	23,3	64,2

Anexo 4

O ENSAIO ACELERADO DE CAVITAÇÃO INDUZIDA POR ULTRA-SOM

O ensaio acelerado de cavitação induzida por ultra-som utilizado neste trabalho foi feito em um aparelho que consiste basicamente de duas partes, um gerador de potência elétrica e um conversor de energia elétrica em vibração mecânica, como mostrado na figura 1.

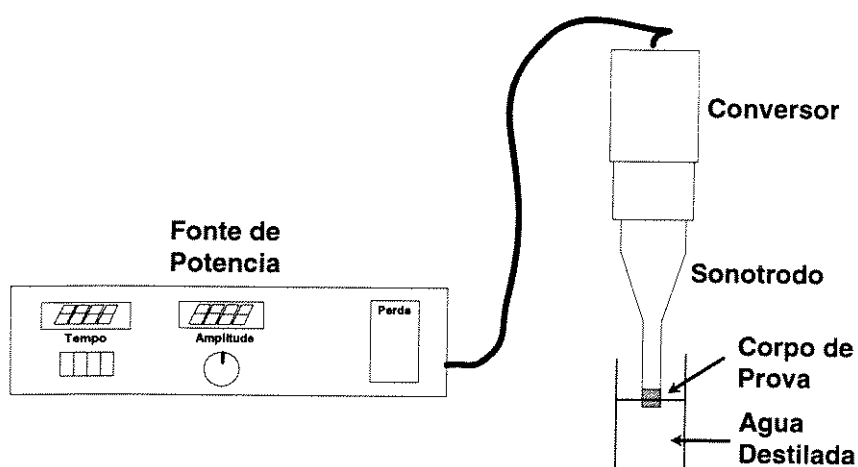


Fig. 1 - Esquema do equipamento e montagem usados no ensaio de cavitação.

O corpo de prova a ser ensaiado é pesado em balança analítica com resolução de 0,1 mg, rosqueado ao sonotrodo e mergulhado a uma profundidade de aproximadamente 2 mm em água destilada, cuja temperatura deve ser mantida constante num intervalo de $\pm 1^\circ\text{C}$. O aparelho é posto a vibrar por um intervalo de tempo ajustável, com amplitude controlável, a uma frequência fixa. Ao fim de cada intervalo de tempo, o corpo de prova deve ser limpo, secado e pesado. O uso de acetona é aconselhável nestas operações. Com os dados obtidos traçam-se curvas de perda de massa acumulada em função do tempo e da taxa de perda de massa em função do tempo. A perda de energia no sistema deve ser mantida abaixo de um valor limite, para se evitar danos ao equipamento. Esta perda é indicada num mostrador e controlada automaticamente, sendo o sistema desligado caso o limite seja excedido.