UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS ENGENHARIA MECÂNICA

Leonardo Geremia

ANÁLISE DO DESGASTE EROSIVO EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

São Leopoldo

2006

Leonardo Geremia

ANÁLISE DO DESGASTE EROSIVO EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

Trabalho de Conclusão apresentado à Universidade do Vale do Rio dos Sinos como requisito parcial para obtenção do título de **graduado** em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ms. Néderson da Silva Koehler

São Leopoldo

2006

Leonardo Geremia

ANÁLISE DO DESGASTE EROSIVO EM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

Trabalho de Conclusão apresentado à Universidade do Vale do Rio dos Sinos como requisito parcial para obtenção do título de **graduado** em Engenharia Mecânica.

Aprovado em junho de 2006

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich – UNISINOS

Prof. Ms. Cândido Norberto Postingher – UNISINOS

Prof. Ms. Walter Andrey Fontana – UNISINOS

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivo Antônio Geremia e Dorací Mazzotti Geremia, pelo amor, carinho, dedicação e exemplo de vida. Dedico também aos meus amigos, que me motivam a seguir em frente, sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ms. Néderson da Silva Koehler por toda a orientação realizada no decorrer deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER – UFRGS), em especial ao Dr. Caio Marcelo Marques e ao futuro engenheiro de materiais, Fernando Beuren Araujo, por todo o apoio e conhecimento transmitido.

Aos inúmeros amigos pelas palavras de incentivo, pela paciência nas horas de estudo, e pelo que significam pra mim.

Ao Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann, por disponibilizar o LACER para a realização do trabalho.

À UNISINOS e seus professores, pelo aprendizado e conhecimento transmitido durante estes anos.

"Aqueles que se enamoram somente da prática, sem cuidar da teoria, ou melhor, dizendo, da ciência, são como o piloto que embarca sem timão nem bússola. A prática deve alicerçar-se sobre uma boa teoria, à qual serve de guia a perspectiva; e em não entrando por esta porta, nunca se poderá fazer coisa perfeita nem na pintura, nem em nenhuma outra profissão".

Leonardo Da Vinci

RESUMO

O desgaste erosivo é o desgaste predominante no processo de cominuição de carvão mineral. A cominuição do carvão é uma etapa indispensável na preparação para sua queima em uma usina termoelétrica. Este trabalho é um estudo do desgaste erosivo em revestimentos aspergidos termicamente, como alternativa ao aço utilizado nos martelos dos moinhos de cominuição do carvão mineral. O trabalho consiste de uma pesquisa bibliográfica acerca do desgaste erosivo e dos processos de aspersão térmica. Paralelamente à pesquisa bibliográfica, foi feita uma pesquisa empírica em que foram realizados experimentos em amostras aspergidas termicamente e no aco dos martelos. Foram estudados os revestimentos de WC 12Co, Cr₃C₂-NiCr e NiCrBSiFe. O teste de desgaste erosivo, que atende a norma ASTM G76-95, foi realizado para caracterizar quantitativamente os materiais propostos. Para a análise qualitativa dos materiais envolvidos, utilizou-se a análise da micrografia óptica e eletrônica de varredura, onde foram identificados os mecanismos de desgaste erosivo responsáveis pela degradação da superfície erodida. Os materiais estudados foram submetidos ao desgaste erosivo em ângulos de impacto das partículas sólidas de 30°, 60° e 90°. Variáveis como velocidade, forma e tamanho de partículas erosivas, assim como a temperatura, não foram estudadas.

Palavras-chave: desgaste erosivo, aspersão térmica, carvão mineral.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Interior de um moinho de cominuição de carvão mineral. As setas indicam os martelos
Figura 1-2 Martelo do moinho de cominuição de carvão mineral. A seta mostra o desgaste erosivo que ocorre no martelo16
Figura 3-1 Tipos de desgaste: (a) abrasivo; (b) adesivo; (c) erosivo e d) cavitação (Marques, C. 2006; adaptado de Ball, 1986)20
Figura 3-2 Mecanismos de desgaste abrasivo: (1) e (2) dois corpos em contato; (3) e (4) desgaste abrasivo de 3 corpos em contato (adaptado de Gordon England, 2006)
Figura 3-3 Mecanismo de desgaste adesivo (Gordon England, 2006)22
Figura 3-4 Conjunto de forças atuantes sobre uma partícula de erodente (Hutchings, 1992)
Figura 3-5 Experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e três mecanismos postulados para remoção de material (Finnie, 1995)24
Figura 3-6 Fotografia de alta velocidade do choque a 30 ° de um cubo de aço ferramenta sobre um aço de baixo carbono (HUTCHINGS, 1977)25
 Figura 3-7 Mecanismo de desgaste. 1. Fadiga da fase intergranular; 2. Microtrincas no contorno de grão; 3. Indução de microtrincas no grão; 4. Desprendimento do grão; 5. Desprendimento de fragmentos de grão (Madruga, Silveira e Bergmann, 1994).
Figura 3-8 Comportamento da taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis (Sundararajan et al., 1997)29
Figura 3-9 Resistência ao desgaste de materiais e sistemas de revestimentos (Kulu et al., 2005)
Figura 3-10 Faixas de temperaturas e velocidades de processos de aspersão térmica (MCCUNE, 1995)

Figura 3-11 Esquema ilustrativo de uma pistola de aspersão térmica por D-Gun. (1) injeção de pó; (2) nitrogênio, oxigênio e acetileno; (3) vela de ignição; (4) tubo de aceleração de partículas; (5) revestimento. (figura cedida por Praxair Surface Technologies)40
Figura 3-12 Esquema de funcionamento de uma pistola de Plasma Spray (Praxair Surfaces Technologies)41
Figura 3-13 Esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica por HVOF (cedido por Praxair Surfaces Technologies)43
Figura 4-1 Fluxograma da metodologia utilizada45
Figura 4-3 Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida. O tamanho médio do grão é de 184 μm. (ABCERAM, 2006)50
Figura 4-4 Desenho do corpo de prova51
Figura 4-5 Máquina de jateamento abrasivo Febratec Tecjato
Figura 4-6 Equipamentos utilizados na aspersão térmica das amostras: (1) Console e alimentador de pó Tafa/Praxair; (2) Pistola de HVOF Tafa/Praxair53
Figura 4-7 Equipamento para ensaios de desgaste erosivo indicando as partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar; (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) sistema venturi-acelerador de partículas; e (4) e câmara de testes
Figura 4-8 Sistema de alimentação de partículas erodentes
Figura 4-9 Esquema ilustrativo do sistema de aceleração59
Figura 4-10 Venturi de aceleração de partículas erosivas60
Figura 4-11 Interior da câmara de testes. Suporte de corpo de prova61
Figura 4-12 Pré-teste da taxa de erosão em relação ao tempo nos revestimentos de WC 12Co, NiCrBSiFe e Cr ₃ C ₂ -NiCr63
Figura 5-1 Variação da taxa de erosão, em perda de volume do material alvo por massa de erodente utilizada, em função do ângulo de impacto
Figura 5-2 Revestimento de WC 12Co, antes e depois de erodido (90°). Aumento de 1500x70

- Figura 5-3 Desgaste erosivo no revestimento de WC 12Co, para os ângulos de incidência do erodente de 30° e 90°. Aumento de 800x......71
- Figura 5-5 Desgaste erosivo no revestimento de NiCrBSiFe, para os ângulos de incidência do erodente de 30° e 90°. Aumento de 800x......72
- Figura 5-6 Detalhe do mecanismo de deformação plástica no revestimento de NiCrBSiFe, para os ângulos de 30° e 90°. Aumento de 1500x......72
- Figura 5-7 Superfície do revestimento de Cr₃C₂-NiCr com incidência das partículas erodentes de 90°. Aumento de 800x......73
- Figura 5-8 Detalhe da ocorrência de desgaste por fratura frágil e por deformação plástica no revestimento de Cr3C2-NiCr, com angulo de impacto da partícula de 90°. Aumento de 3000x......74
- Figura 5-9 Superfície do aço dos martelos, submetida ao desgaste erosivo por impacto de partícula sólida a 90°. Aumento de 1500x......75
- Figura 5-10 Taxa de erosão volumétrica em função da dureza dos corpos de prova investigados em ângulos de incidência do erodente de 30, 60 e 90º.77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 Parâmetros de aspersão térmica do WC 12Co (Woka 3102) para TafaJP500047
Tabela 4-2 Parâmetros de aspersão térmica do NiCrBSiFe (1275H) para Tafa JP500048
Tabela 4-3 Parâmetros de aspersão térmica do Cr ₃ C ₂ -NiCr (CRC 410-1) para Tafa JP500049
Tabela 4-4 Valores representativos da análise granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida.50
Tabela 5-1 Densidade teórica, porosidade e densidade aparente obtidas nos revestimentos aspergidos e utilizadas no cálculo da taxa de erosão volumétrica
Tabela 5-2 Resultados obtidos no teste de erosão para a taxa de erosão volumétrica e o percentual de erro calculado67
Tabela 5-3 Valores de dureza, medidos em Vickers, aplicando carga de 500g, e desvio padrão para cada material estudado76

SUMÁRIO

AG	RADECIMEN	TOS	5
RE	SUMO		7
LIS	TA DE FIGUI	7AS	8
LIS	TA DE TABE	LAS	11
SUI	MÁRIO		12
1	INTRODUC	ÃO	14
2	OB.IFTIVOS		
3	REVISÃO B	IBLIOGRÁFICA	
3	1 DESGA	STE	18
Ŭ	3.1.1 Tip	os de Desgaste	
	3.1.2 De	sqaste Erosivo	22
	3.1.2.1	Fatores de Influência Operacionais	27
	3.1.2.2	As Propriedades das Partículas como Fatores de Influência.	30
	3.1.2.3	Propriedades da Superfície como Fatores de Influência	31
3	.2 ASPER	SÃO TÉRMICA	36
	3.2.1 Hig	h Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	42
4	MATERIAIS	E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4	.1 MATER	IAIS	46
4	.1 MATER <i>4.1.1 Aç</i> a	IAIS o dos Martelos	46 46
4	.1 MATER <i>4.1.1 Aç</i> a <i>4.1.2 Ca</i>	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co)	46 46 47
4	1 MATER 4.1.1 Aço 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi)	46 46 47 48
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr)	46 46 47 48 49
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida	46 46 47 48 49 49
4	1 MATER 4.1.1 Aço 4.1.2 Cal 4.1.3 Bas 4.1.4 Cal 4.1.5 Alu 2 MÉTOD	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr $_3C_2$ -NiCr) mina Eletrofundida	46 46 47 48 49 49 51
4	1 MATER 4.1.1 Aço 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS pricação dos Corpos de Prova	46 47 48 49 49 51 51
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre	IAIS b dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS pricação dos Corpos de Prova eparação Superficial	46 47 48 49 51 51
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asp	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS pricação dos Corpos de Prova paração Superficial persão Térmica por HVOF	46 47 48 49 51 51 53 53
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOE 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asy 4.2.4 Ca	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova paração dos Corpos de Prova persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova	46 47 48 49 51 51 51 53 54 54
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asp 4.2.4 Ca 4.2.4 Ca 4.2.4.1 4.2.4.1	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova paração Superficial persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova Avaliação da Porosidade Medição da Microdureza	46 47 48 49 51 51 51 53 54 54 55
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asy 4.2.4 Ca 4.2.4.1 4.2.4.1 4.2.4.2 4.2.4.3	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova paração Superficial persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova Avaliação da Porosidade Medição da Microdureza	46 47 48 49 51 51 51 53 54 54 55 55
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.3 Asy 4.2.4 Ca 4.2.5 Eau	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova paração Superficial persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova Avaliação da Porosidade Medição da Microdureza Microestrutura ujpamento de Teste	46 47 48 49 51 51 51 53 54 55 55 55
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOE 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asp 4.2.4 Ca 4.2.4.1 4.2.4.2 4.2.4.3 4.2.5 Equ 4.2.5.1	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova oparação Superficial persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova Avaliação da Porosidade Medição da Porosidade Medição da Microdureza Microestrutura sistema de Pré Aquecimento do Ar	46 47 48 49 49 49 51 51 51 51 51 54 55 55 55 55 55 55
4	1 MATER 4.1.1 Aça 4.1.2 Ca 4.1.3 Bas 4.1.4 Ca 4.1.5 Alu 2 MÉTOD 4.2.1 Fal 4.2.2 Pre 4.2.3 Asµ 4.2.4 Ca 4.2.5 Equal 4.2.5.1 4.2.5.1	IAIS o dos Martelos rboneto de Tungstênio (WC 12Co) se de Níquel (NiCrBFeSi) rboneto de Cromo (Cr ₃ C ₂ -NiCr) mina Eletrofundida OS oricação dos Corpos de Prova eparação Superficial persão Térmica por HVOF racterização dos Corpos de Prova Avaliação da Porosidade Medição da Porosidade Microestrutura <i>uipamento de Teste</i> Sistema de Pré Aquecimento do Ar Sistema de Pré Aquecimento do Ar	46 47 48 49 49 49 51 51 51 51 53 54 54 55 55 55 55 55 55 57

	4.2.5.4	Câmara de Testes	60			
	4.2.6 De	efinição dos Parâmetros de Ensaio	61			
	4.2.6.1	Temperatura de Ensaio	61			
	4.2.6.2	Fluxo de Partículas	61			
	4.2.6.3	Velocidade de Impacto	62			
	4.2.6.4	Tempo de Ensaio	62			
	4.2.6.5	Ângulo de Incidência do Erodente	63			
	4.2.7 De	eterminação do Desgaste	63			
	4.2.7.1	Erro das Medidas	65			
5	RESULTAD	DOS E DISCUSSÃO	66			
6	CONCLUS	ÃO	78			
RE	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA					

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é utilizado em diversas usinas termoelétricas como combustível na geração de energia elétrica. No circuito de preparação do carvão para sua utilização na usina, encontra-se a cominuição do mesmo, que consiste na redução de seu tamanho. A cominuição do carvão é um processo que visa produzir as distribuições granulométricas desejadas para a posterior combustão, além de visar à liberação das incrustações rochosas. Para a cominuição do carvão mineral, são utilizados moinhos de impacto, que funcionam através da moagem mediante impacto com os martelos do moinho (Figura 1-1). O carvão mineral é o responsável pelo desgaste intenso nos martelos dos moinhos de cominuição (Figura 1-2). O principal e mais freqüente desgaste neste tipo de aplicação é o desgaste erosivo por impacto de partículas sólidas. Desta forma, pode-se salientar a importância do estudo do desgaste erosivo e dos seus mecanismos envolvidos, propondo alternativas para aumentar a vida útil dos martelos e minimizar as paradas nesses moinhos, através da utilização de revestimentos aspergidos termicamente.

O desgaste erosivo por partículas sólidas é a perda progressiva de material pelo impacto dessas partículas sobre uma superfície. Para se compreender os mecanismos de erosão, e então minimizá-los, é preciso entender como essas pequenas partículas sólidas duras podem remover material da superfície durante o impacto. O desgaste erosivo pode possuir mecanismos de desgaste de fratura frágil ou de deformação plástica.



Figura 1-1 Interior de um moinho de cominuição de carvão mineral. As setas indicam os martelos.

A aspersão térmica, como um conjunto de processos de aplicação de revestimentos, tem sido cada vez mais requisitada para o aumento de vida útil de peças e componentes da indústria. As propriedades dos materiais aplicados por aspersão térmica têm sido amplamente estudadas visando o aumento do desempenho de partes e equipamentos. Segundo Wheeler e Wood (2005), sabe-se que a erosão de um material é dependente do ângulo de incidência de uma partícula erosiva sobre sua superfície. Os carbonetos são materiais cerâmicos, que em uma matriz metálica, têm sido amplamente utilizados em combate ao desgaste erosivo, principalmente em ângulos menores. Os materiais metálicos, que se caracterizam por sua maior ductibilidade em comparação aos *cermets* (compósitos de carbonetos em matriz metálica), tendem a sofrer com desgaste erosivo por deformação plástica, e apresentam sua maior resistência ao desgaste nos ângulos próximos a 90°.

Este trabalho faz um estudo qualitativo e quantitativo do desgaste erosivo em revestimentos de carbonetos e ligas metálicas aspergidas termicamente, fazendo

comparação ao aço utilizado nos martelos dos moinhos de cominuição de carvão mineral. Com isso, pretende-se apresentar alternativas resistentes ao desgaste erosivo, que aumentem a vida útil de partes de equipamentos, e diminuam os problemas de paradas de produção. Este trabalho está dividido em capítulos que compreendem, além da presente introdução, o Capítulo 2 onde são expostos os objetivos do trabalho, o Capítulo 3 Revisão Bibliográfica, onde é definido o desgaste erosivo e os fatores que o influenciam, e definido a aspersão térmica, abordando seus processos. No Capítulo 4 Materiais e Procedimento Experimental, são apresentados os materiais estudados, os equipamentos e os procedimentos utilizados na pesquisa empírica. No Capítulo 5 Resultados e Discussão, são demonstrados os resultados dos testes e caracterizações das amostras estudadas, além de uma discussão acerca desses resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 6 Conclusão, são expostas as conclusões devido ao trabalho realizado.



Figura 1-2 Martelo do moinho de cominuição de carvão mineral. A seta mostra o desgaste erosivo que ocorre no martelo.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar alternativas de revestimentos aspergidos termicamente pelo processo de *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF), frente ao desgaste erosivo por partículas sólidas em martelos de moinhos de cominuição de carvão mineral, em uma usina termoelétrica da Tractebel Energia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESGASTE

O desgaste é um fator de perda de desempenho e performance em diversos sistemas mecânicos. Ainda, o desgaste leva a muitos casos de altos custos de manutenção e reposições, além de estar associado a perdas de produtividade. O desgaste deve sempre ser considerado desde cedo em projetos, e não apenas no momento em que um equipamento em serviço apresentou o desgaste como um problema.

Desgaste define-se como o dano em uma ou ambas as superfícies, em contato e movimento relativo, envolvendo perda progressiva de material (HUTCHINGS, 1992). Hoppert (1989), ainda diz que a perda progressiva de material é resultado de causas mecânicas de uma superfície sólida com outro sólido, líquido ou gás. O desgaste também pode coexistir, em alguns casos, com fenômenos de natureza química, como a corrosão, que combinada com outros mecanismos de desgaste, pode causar condições ainda mais drásticas de degradação do material desgastado.

Pode-se afirmar que as superfícies sempre desgastam com a ação de um ou mais processos (LUDEMA, 1996), ou seja, do movimento relativo de duas superfícies, sob ação de um conjunto de forças. O desgaste resultante é sempre uma propriedade do sistema tribológico e depende da combinação dos materiais envolvidos e suas propriedades físicas e químicas (HOPPERT, 1990).

Segundo Ludema (1996), as taxas de desgaste são controladas por uma estimativa entre as taxas de gerações de partículas e perdas de partículas. A taxa de geração de partículas é influenciada por diversos fatores, incluindo a natureza e a quantidade de partículas retidas. Da mesma forma, a quantidade de partículas retidas depende de diversos outros fatores, como o formato das superfícies deslizantes, tipo de vibrações, etc. Assim, a formulação de equações de taxa de desgaste é bastante complicada.

3.1.1 Tipos de Desgaste

Segundo a norma DIN 50320, há quatro mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, erosão e reação triboquímica (combinação de corrosão com outro mecanismo de desgaste). A mesma norma ainda cita outros tipos de desgaste, como a cavitação, fadiga de contato, "*fretting*" e "*scuffing*", que também são causas de deterioração do material.

Devido às diversas variáveis de mecanismos de desgaste, este trabalho fará apenas uma abordagem nos desgastes abrasivo, erosivo, adesão e cavitação. O desgaste erosivo, para fins de revisão bibliográfica, será mais aprofundado. A Figura 3-1 mostra os quatro tipos de desgaste abordados no presente trabalho.

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza, sendo que estas são forçadas contra e ao longo de uma superfície sólida (HAWK, 1999).



Figura 3-1 Tipos de desgaste: (a) abrasivo; (b) adesivo; (c) erosivo e d) cavitação (Marques, C. 2006; adaptado de Ball, 1986).

Segundo Hutchings (1992), os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto desgaste por deformação plástica, como desgaste por fratura frágil. Em algumas circunstâncias, a deformação plástica deve ocorrer de forma isolada. Porém, os dois tipos de mecanismos de desgaste abrasivo geralmente ocorrem simultaneamente. O desgaste abrasivo pode ser distinto também entre contato de dois corpos ou contato de três corpos, conforme mostrado na Figura 3-2. Para Marques, C. (2006), a taxa de desgaste depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material que está sofrendo abrasão. O desgaste será maior quanto mais duro for o abrasivo em relação à superfície que está sofrendo desgaste.



Figura 3-2 Mecanismos de desgaste abrasivo: (1) e (2) dois corpos em contato; (3) e (4) desgaste abrasivo de 3 corpos em contato (adaptado de Gordon England, 2006)

O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies deslizam uma contra a outra com movimento planejado, produzindo fragmentos de uma superfície aderidos na outra. Este tipo de desgaste é apresentado na Figura 3-1 (b) e na Figura 3-3. Este desgaste provém das altas forças de adesão adquiridas quando dois materiais entram em forte contato. O desgaste adesivo geralmente ocorre quando a lubrificação é inadequada, e resulta em transferência de metal, normalmente chamada de galling (KUSHNER e NOVINSKI, 1992).



Figura 3-3 Mecanismo de desgaste adesivo (Gordon England, 2006)

O desgaste por cavitação é um fenômeno que ocorre em máquinas hidráulicas, tubulações e, de modo geral, em qualquer dispositivo onde exista fluxo/escoamento de fluidos. É definido como o crescimento e colapso de microbolhas, devido à variação de pressão durante o escoamento. As micro-bolhas são formadas em regiões de baixa pressão durante o escoamento e sofrem colapso nas regiões de elevada pressão, removendo material da superfície e formando microcavidades (Hammit *et al.*, 1947). A Figura 3-1 (d) ilustra como a pressão age sobre as bolhas de vapor.

3.1.2 Desgaste Erosivo

O desgaste erosivo é produzido pelo impacto de partículas duras sobre uma superfície. As partículas podem ser transportadas em fluxo de gás ou de líquido (DALLAIRE, 2000). Segundo a norma ASTM G 40-92, erosão é a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, ou um fluido multicomponente ou partículas líquidas ou sólidas impactantes. Observa-se então, que erosão é um tipo de desgaste que se caracteriza pela perda de material, originada pela interação mecânica de uma superfície e um fluído. O fluído pode conter sólidos, ou de origem externa, ou originados pela perda de material da própria superfície. No desgaste erosivo, diversas forças de diferentes origens podem agir em uma partícula em contato com uma superfície sólida, como mostrado na Figura 3-4. Partículas vizinhas podem exercer forças de contato, assim como um fluido em fluxo, se presente, pode causar força de arraste. Em várias circunstâncias, a força gravitacional pode ser importante. No entanto, além de todas essas forças listadas, a força dominante sobre uma partícula erosiva, é a força de contato exercida pela superfície atingida, que é a principal responsável pela desaceleração da partícula de sua velocidade inicial de impacto. No desgaste erosivo, a extensão do desgaste depende da massa e do número de partículas individuais atingindo a superfície, e de sua velocidade de impacto (HUTCHINGS, 1992).





Para Hutchings (1992), assim como no caso do desgaste abrasivo, os mecanismos de erosão devem envolver tanto deformação plástica como fratura frágil. Para Takimi *et al.* (2003), no desgaste erosivo de uma superfície dúctil, pode ocorrer uma deformação elástica, recuperável, ou uma deformação plástica,

permanente. O tipo de deformação irá depender se o limite de escoamento do material é excedido em qualquer ponto durante o impacto. Já nos materiais frágeis, Takimi *et al.* (2003) diz que diferentes modos de criação de trincas contribuem para a perda de material pela erosão.

O desgaste erosivo tem o tipo de mecanismo de desgaste diretamente relacionado com o ângulo de incidência da partícula erosiva sobre a superfície atingida. Para Wheeler e Wood (2005), a erosão de um material depende do ângulo que cada partícula atinge a superfície alvo, e acrescenta que em materiais dúcteis, a taxa de erosão é maior em baixos ângulos de colisão, em contraste aos materiais frágeis, em que apresentam suas maiores taxas de desgaste erosivo em ângulos próximos a 90°. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pela diferença de mecanismos de desgaste erosivo envolvidos em cada situação. A Figura 3-5 apresenta uma curva típica de metal dúctil, demonstrando e relacionando o mecanismo de desgaste com o ângulo de ataque do erodente.



Figura 3-5 Experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e três mecanismos postulados para remoção de material (Finnie, 1995).

Ludema (1996) propõe que o choque de partículas duras e agudas a baixos ângulos irá cortar materiais dúcteis ou moles. A perda de material por corte inicia logo que a partícula colide na superfície. Essa perda de material é representada na Figura 3-6.



Figura 3-6 Fotografia de alta velocidade do choque a 30 ° de um cubo de aço ferramenta sobre um aço de baixo carbono (HUTCHINGS, 1977).

Para ângulos normais de ataque, Ludema (1996) sugere que partículas de qualquer forma ou dureza irão provocar fadiga superficial ao material atingido, causando perdas. Porém o início dessas perdas é atrasado, conforme o material começa a fadigar. Os materiais frágeis, como os cerâmicos, têm grande susceptibilidade a trincas e microfissuras, portanto, são removidos preferencialmente pela interligação de trincas que divergem do ponto de choque da partícula com a superfície (Hoppert, 1990). A Figura 3-7 ilustra, esquematicamente, o mecanismo de desgaste de materiais frágeis, para ângulos próximos a 90º, segundo Madruga, Silveira e Bergmann (1994).



Figura 3-7 Mecanismo de desgaste. 1. Fadiga da fase intergranular; 2. Microtrincas no contorno de grão; 3. Indução de microtrincas no grão; 4. Desprendimento do grão; 5. Desprendimento de fragmentos de grão (Madruga, Silveira e Bergmann, 1994).

Segundo Ball (1986), as principais variáveis que afetam a severidade da erosão incluem tamanho, natureza, massa da partícula, tipo e velocidade do fluxo e ângulo de impacto. Hoppert (1989) salienta ainda que a resistência à erosão do material alvo depende também de sua estabilidade no meio, bem como de suas propriedades físicas e mecânicas.

Portanto, segundo Finnie (1995), quando um fluxo de partículas atinge a superfície de um material, o desgaste resultante depende de fatores como as condições em que o fluxo incide sobre a superfície do material, de propriedades do material e das partículas incidentes. Os principais fatores responsáveis pelo processo de erosão podem ser assim distribuídos.

 a) Operacionais: velocidade da partícula; ângulo de impacto; temperatura;
 número de partículas por unidade de área por unidade de tempo; corrosividade do meio;

b) Propriedades das partículas: tipo de material, tamanho, forma; densidade; dureza.

c) Propriedades da superfície: tipo de material, morfologia; nível de tensões; dureza; rugosidade; tamanho de grão; porosidade.

3.1.2.1 Fatores de Influência Operacionais

A velocidade de impacto das partículas erodentes tem um significativo efeito sobre a taxa de erosão (ΔE) de um material. O valor de ΔE é dado pela razão entre a quantidade de material perdido no desgaste e sua quantidade original. A dependência da velocidade é caracterizada por um expoente *p* e dada pela Equação 3.1 (Sundararajan *et al.*, 1997).

$$\Delta E = \Delta E_0 . V^{\rho}$$
 3.1

onde:

 ΔE = taxa de desgaste erosivo (g_{alvo}/g_{erodente});

 ΔE_o = taxa de desgaste erosivo para temperatura ambiente ($g_{alvo}/g_{erodente}$);

V = velocidade de impacto (m/s);

p = constante do material.

Para Ludema (1996), a constante p esta na faixa de 2 a 2,5 para metais, e na faixa de 2,5 a 3 para materiais cerâmicos. No caso de materiais metálicos, experimentos realizados por Hutchings (1979) mostram que para ângulos abaixo de 90°, o valor de p é igual a 2,4. Em estudos similares realizados por Shewmon e Sundararajan (1983), o valor de p encontrado foi de 2,55. Estes valores contrastam com os valores encontrados para cerâmicos e polímeros que são de 3 e 5 respectivamente.

O expoente p também depende de outros fatores importantes como ângulo de impacto, tamanho de partículas, entre outros. Goodwin *et al.* (1969) constataram que o valor de p decresce com a diminuição do tamanho das partículas. Também foi observado que p seria função da forma da partícula erodente.

Para Hutchings (1979) a erosão varia com a velocidade, e também com o ângulo de impacto, de acordo com a Equação 3.2, para quase todos os materiais.

$$E = K . V^{\rho} . f(\theta)$$
 3.2

onde:

E = erosão relativa da massa (adimensional);

V = velocidade de impacto da partícula;

 $f(\theta)$ = função adimensional do ângulo de impacto;

p = constante do material.

Segundo Sundararajan *et al.* (1997), o ângulo de impacto é definido como sendo o ângulo formado pela superfície do material alvo e a linha de trajetória entre as partículas erodentes. A influência do ângulo de impacto nas taxas de erosão se dá em função da natureza do material alvo. Em materiais dúcteis como metais e ligas, a máxima taxa de erosão acontece com ângulos entre 15 e 30º. Em contraste, para materiais frágeis, a taxa máxima de erosão se dá em ângulos normais (90º), conforme descrito pela Figura 3-8.



Figura 3-8 Comportamento da taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis (Sundararajan et al., 1997).

A temperatura influencia diretamente o processo de erosão por atuar tanto nas propriedades dos materiais envolvidos no processo (erosivo e material sob erosão) quanto nas variáveis processuais. Experimentos realizados por Suckling e Allen (1997) mostraram que o efeito da temperatura em metais com ausência de corrosão pode ser menor do que esperado. Isto se dá porque as alterações causadas pela temperatura em propriedades diretamente relacionadas com o processo de erosão, como a dureza do erodente, são relativamente pequenas. Entretanto, em um estudo erosão-corrosão, a taxa com a qual as partículas atingem a superfície é uma variável importante, pois vai determinar se estas estão erodindo primariamente o metal base ou o óxido formado na corrosão.

A taxa de fluxo de partículas é outro fator operacional que tem influência na taxa de erosão. Resultados experimentais, como os obtidos por Montgomery e Clarke (1962) mostraram que um excesso de fluxo de partículas acarreta em um decréscimo na taxa de erosão devido ao choque das partículas incidentes contra as partículas que ricocheteiam após o impacto contra a superfície. Anand *et al.* (1987) fizeram um modelo sobre esse efeito do choque entre as partículas e concluíram que a taxa de erosão decresceria exponencialmente com o aumento do fluxo.

3.1.2.2 As Propriedades das Partículas como Fatores de Influência

O tamanho de partículas também é uma importante variável no estudo do comportamento da erosão. Segundo Hutchings (1992), as partículas responsáveis pelo desgaste erosivo estão na faixa de 5 a 500 μ m. A taxa de erosão aumenta em função do aumento do tamanho de partículas. Esta relação se dá com partículas de tamanho entre de 50 a 100 μ m. A partir de 100 μ m, a taxa de erosão não depende mais do tamanho de partícula. Para Ludema (1996), a taxa de erosão aumenta conforme a Equação 3.3, aonde *m* é aproximadamente 3.

$$\Delta E = \Delta E_0 . S^m \tag{3.3}$$

onde:

 ΔE = taxa de desgaste erosivo (g_{alvo}/g_{erodente});

 ΔE_o = taxa de desgaste erosivo para temperatura ambiente ($g_{alvo}/g_{erodente}$);

S = tamanho da partícula (m);

m = constante do material.

A forma da partícula é um fator de grande influência no desgaste erosivo. Para Hutchings (1992), as maiores responsáveis pelo desgaste erosivo são as partículas agudas. Porém há uma grande variação na sua angularidade, dependendo na sua origem. A taxa de erosão é dependente do formato das partículas. A diferença de uma partícula angular para uma esférica, no desgaste erosivo, pode ser de fator 10 ou mais. Porém, segundo Hutchings (1992), é extremamente difícil quantificar o quanto o formato da partícula influencia na erosão. É importante perceber que partículas angulares têm maior facilidade de gerar uma indentação do que partículas esféricas.

Além da forma, outra propriedade da partícula que afeta a taxa de erosão é a dureza. Levy (1995) investigou a influência da dureza das partículas erodentes na taxa de erosão de aços. Em seu estudo, notou que para partículas erodentes com dureza pelo menos duas vezes maior que a do material alvo não há influência desta propriedade na taxa de erosão. Para partículas com dureza semelhante ao material alvo, a taxa de erosão cai consideravelmente.

3.1.2.3 Propriedades da Superfície como Fatores de Influência

As propriedades da superfície de um material sujeito ao desgaste erosivo podem influenciar de diversas maneiras na taxa de desgaste erosivo. Desta forma, foi estudado o desgaste erosivo em materiais metálicos, cerâmicos e *cermets* (compósitos de cerâmica e metal).

Um material metálico, ao ser atingido por uma partícula sólida, pode sofrer uma deformação plástica ou elástica, dependendo das propriedades do mesmo, principalmente à tensão de escoamento deste material. (TAKIMI *et al*, 2003). No mecanismo de sulcamento, o metal deslocado é extrudado em uma borda no final da cratera de impacto e, dependendo do ângulo de impacto e velocidade, a borda pode destacar, formando uma fonte de perda de massa (HUTCHINGS, 1992). Hutchings ainda descreve que o mecanismo de erosão em materiais metálicos para impactos próximos ao ângulo normal pode ser dividido em três fases distintas que ocorrem sequencialmente. Na fase inicial, o impacto da partícula forma uma cratera e o material é extrudado ou desprendido. Na segunda fase, o metal deslocado é deformado por impactos subseqüentes, podendo conduzir a um deslocamento lateral do material, o qual é destacado da superfície. Após alguns impactos, o material deslocado torna-se severamente deformado, e é então destacado da superfície por uma fratura dúctil.

Segundo Zhou e Bahadur (1993), para os materiais cerâmicos, basicamente, há duas classificações que usualmente são aceitas para explicar o mecanismo de fratura desses materiais. Uma está baseada no mecanismo de fratura puramente elástica e a outra no mecanismo de fratura elasto-plástica. Estes mecanismos vão depender do tamanho das partículas impactantes. A fratura puramente elástica funciona bem para partículas no qual o raio no ponto de impacto é maior que o raio crítico (maior que 200µm) e produzem trincas cônicas chamadas trincas de *Hertzian*. A outra teoria é aceita para partículas pequenas, as quais produzem trincas laterais e radiais. Entretanto, para o caso da fratura puramente elástica é necessário que haja uma intersecção entre várias fraturas cônicas para que haja o desprendimento do material da superfície. No caso da fratura elástico-plástica, a remoção de material pode acontecer sem que haja essa intersecção entre as trincas. Para Zhou e Bahadur (1993), considerando o modelo elasto-plástico, duas teorias são consideradas: quase estática e dinâmica. A maior diferença entre estas é que na teoria dinâmica o cálculo da força de impacto das partículas inclui o efeito de

32

tensões dinâmicas e, na teoria quase estática, a energia cinética das partículas é absorvida completamente na forma de deformação plástica.

A erosão por partículas sólidas em condições extremas é um grande problema em equipamentos industriais, onde se observa uma forte influência do comportamento do material alvo. Em função das solicitações, as tensões geradas nas partículas e/ou no material alvo são, aproximadamente, uma ordem de grandeza maior que sua resistência, e como resultado, pode ocorrer o dano no material. Baseados nas características estruturais e propriedades dos materiais, a fratura pode ter natureza diferente: no caso de sólidos frágeis (como os cerâmicos) a fratura direta é dominante, já no caso dos dúcteis (como os metais) prevalecem mecanismos de micro-corte, lascamento e/ou fadiga de baixo ciclo. Correlacionando as diferentes classes de materiais frente ao desgaste erosivo, observam-se algumas fortes diferenças. Por exemplo, em relação ao ângulo de impacto a literatura já deixa claro que em baixos ângulos os materiais cerâmicos são suficientes para reduzir o desgaste erosivo devido a suas propriedades de elevada dureza e tenacidade. Por outro lado, se um material está sujeito ao impacto de partículas em ângulo próximo a normal (90°), a superfície exposta deve ser capaz de suportar repetidas deformações. Neste caso, materiais mais plásticos como os aços poderiam ter preferência em relação aos cerâmicos e revestimentos cerâmicos, nos quais as trincas progridem rapidamente e conduzem a remoção do material. Esta relação entre as propriedades dos materiais e a resistência ao desgaste está mostrada na Figura 3-9.



Figura 3-9 Resistência ao desgaste de materiais e sistemas de revestimentos (Kulu et al., 2005).

Porém, em algumas situações há uma mistura de mecanismos que conduz ao desgaste erosivo, como mecanismos de corte, lascamento, fadiga e fratura frágil. Nestes casos há uma controvérsia entre a dureza e a tenacidade à fratura dos materiais e revestimentos. Os revestimentos compósitos de matriz metálica, reforçados com partículas cerâmicas, resolvem parcialmente este problema (KULU *et al*, 2005). Nestas condições de desgaste, sistemas baseados em WC-Co e revestimentos termicamente aspergidos nesta base são altamente efetivos. Wang e Lee (1997) observam que os materiais aspergidos termicamente, como os *cermets*, são freqüentemente usados para resistir a diferentes formas de desgaste, em diversas aplicações industriais, inclusive em situações de erosão em temperaturas elevadas, onde podem ocorrer fenômenos sinérgicos de erosão-oxidação.

Segundo Marques (2006), o amplo uso de *cermets* como materiais de revestimento pode ser atribuído devido a sua combinação de desejáveis propriedades como a alta dureza, resistência mecânica, rigidez e resistência ao

desgaste. Por outro lado, é necessário testar diferentes revestimentos sob condições distintas de solicitações de desgaste, pois há falta de informações sobre o comportamento de diferentes tipos e categorias de *cermets*. Carbonetos a base de tungstênio (WC) ligados com Co são amplamente utilizados por sua excelente resistência ao desgaste, porém em temperaturas elevadas e meios agressivos a baixa resistência a corrosão deste sistema de revestimento restringe sua aplicação. Nestes casos adotam-se o uso de outros ligantes para a matriz metálica, como o ferro e o níquel. Os *cermets* mais conhecidos como livres de tungstênio são à base TiC e Cr₃C₂ inseridos em matriz de ligas metálicas de Ni, Cr e Mo.

Na investigação para definir os mecanismos responsáveis pela erosão em materiais *cermets*, alguns autores apontam para a dureza como fator dominante. Por exemplo, segundo Hawthorne, *et al.* (1999) para revestimentos *cermets* em baixos ângulos de ataque há um aumento da resistência à erosão com o aumento da quantidade de carbonetos, e, portanto, da fase de maior dureza do revestimento, provavelmente em função do mecanismo que rege este tipo de degradação. Podese constatar que para baixos ângulos de impacto a resistência à erosão aumenta com o aumento da dureza do carboneto, enquanto há uma oposição para os revestimentos metálicos, provavelmente devido à diferença de mecanismos entre estes dois tipos de materiais.

Kulu *et al.* (2005) resumem bem a influência da dureza na resistência ao desgaste de revestimentos de *cermets*. Os autores observam que à temperatura ambiente, a dureza tem um grande efeito no desgaste de materiais pelo mecanismo de deformação plástica, enquanto que a tenacidade à fratura é um fator dominante no desgaste envolvendo a fratura frágil. Porém, outras propriedades estão

envolvidas na determinação dos modos de desgaste erosivo de revestimentos *cermets*, como por exemplo, a porosidade do mesmo.

3.2 ASPERSÃO TÉRMICA

Aspersão térmica é um grupo de processos utilizados para a aplicação de revestimentos metálicos ou não metálicos. Crawmer (2004) define aspersão térmica como uma família de processos que utilizam uma fonte de calor concentrada para fundir materiais enquanto gera-se energia cinética, utilizando processo de jato para propelir as partículas fundidas para uma superfície preparada.

Conforme Crawmer (2004), estes processos estão classificados em três categorias: aspersão por chama, aspersão por arco elétrico e aspersão por plasma. Estas três fontes de energia são utilizadas para aquecer o material do revestimento para um estado fundido ou semi fundido. As partículas resultantes do aquecimento são aceleradas e propelidas até uma superfície previamente preparada. As partículas colidem e se conformam à irregularidade da superfície, formando uma ligação com o substrato. As partículas subseqüentes vão formando uma camada, através de uma estrutura lamelar, e resfriam à altas taxas. (LIMA e TREVISAN, 2001). O material pode ser fornecido em forma de pó, arame ou vareta.

Herman e Sampath (ca. 2000) classificam os processos em dois grupos, conforme a fonte de calor: química (através de combustão) e elétrica (arco). Desta forma, estes autores incluem o processo de plasma no grupo de processos por fonte de calor por arco elétrico. Crawmer (2004), ainda cita o processo de aspersão por
energia cinética como processo de aspersão térmica. Este processo também é conhecido como cold spray.

A grande vantagem dos processos de aspersão térmica é a grande variedade de materiais possíveis de se utilizar para a produção de revestimentos. Outra grande vantagem da maioria dos processos de aspersão térmica, é a capacidade de se produzir revestimentos sem aumento significativo de temperatura do substrato. Assim, pode-se aplicar revestimentos, mesmo de materiais com alto ponto de fusão, sem alterar as propriedades do material do substrato, e praticamente sem alterações geométricas.

Como mencionado anteriormente, a aspersão térmica é classificada em subgrupos conforme sua fonte de energia térmica: chama, arco elétrico e plasma. Os processos de chama consistem basicamente do processo de chama convencional (chama externa), e dos processos de *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) e *Detonation Gun* (ambos chama interna). Os processos de plasma e de arco elétrico não possuem diversos métodos, mas têm variações em seu processo quanto à seus parâmetros e ambiente de aspersão.

A Figura 3-10 apresenta as faixas de temperaturas e velocidades utilizadas nos processos de aspersão térmica. O processo de aspersão térmica de plasma apresenta altas faixas de temperatura, o que caracteriza a possibilidade de aspersão de materiais com alto ponto de fusão, como os materiais cerâmicos. Os processos de aspersão por HVOF e D-Gun apresentam alta velocidade e temperaturas com capacidade de fundir materiais metálicos e *cermets*. Os processos de arco elétrico e chama convencional são os processos que utilizam baixas temperaturas e baixas velocidades de aspersão, em comparação aos outros processos de aspersão

térmica, e por isso apresentam altas porosidades e baixa adesão. Na contramão destes processos, o processo de *cold spray* utiliza altíssimas velocidades de aceleração das partículas, e baixíssimas temperaturas, o que o torna um processo ideal para aplicação de revestimento de materiais dúcteis.



Velocidade da partícula, 103 ft/s

Figura 3-10 Faixas de temperaturas e velocidades de processos de aspersão térmica (MCCUNE, 1995).

Neste trabalho, para fins de revisão bibliográfica, serão abordados os processos de chama, plasma, detonação, arco elétrico e *cold spray* e HVOF.

O processo de chama convencional, conforme Crawmer (2004), foi o primeiro processo de aspersão térmica desenvolvido, por volta de 1910, e é utilizado até a atualidade. Este processo emprega ar comprimido ou oxigênio, em mistura com uma variedade de combustíveis (acetileno, propileno, propano, hidrogênio) na

combustão, tanto para fundir como para propelir as partículas fundidas. Geralmente, este processo dispõe de baixo rendimento no revestimento, e não é empregado onde alta densidade e revestimentos de alta adesão são solicitados. As razões para estas deficiências estão relacionadas com a baixa velocidade da chama que propele as partículas, de aproximadamente 50 m/s, e pela baixa temperatura alcançada na combustão. A Figura 3-10 mostra a baixa faixa de temperatura e velocidade utilizadas nesse processo. Como matéria prima para o revestimento, o processo de chama convencional utiliza pó, arame ou vareta. Este processo foi muito difundido devido sua relativa simplicidade de utilização e baixo custo. (HERMAN E SAMPATH, ca. 2000).

O processo *detonation gun* (D-Gun) é um processo que utiliza a energia da explosão para aquecer e impelir materiais em pó para a superfície do substrato a ser revestido (LIMA e TREVISAN, 2001). Ao contrário de uma chama estacionária, como utilizada em outros processos, a pistola de detonação utiliza a energia de explosões de uma mistura de oxigênio e acetileno. O depósito resultante é extremamente duro, denso e fortemente ligado ao substrato. A Figura 3-10 apresenta a faixa de temperatura e velocidade deste processo.

A Figura 3-11 representa esquematicamente uma pistola de aspersão por detonação. Enquanto os gases nitrogênio, oxigênio e acetileno (2) são injetados na câmara de combustão, simultaneamente à matéria prima, que é fornecida em pó (1), faíscas (3) são geradas, estabelecendo explosões de quatro a oito vezes por segundo, que aquecem e aceleram as partículas fundidas, expelindo-as em direção ao substrato, formando a camada de revestimento em uma superfície previamente preparada. (5).



Figura 3-11 Esquema ilustrativo de uma pistola de aspersão térmica por D-Gun. (1) injeção de pó; (2) nitrogênio, oxigênio e acetileno; (3) vela de ignição; (4) tubo de aceleração de partículas; (5) revestimento. (figura cedida por Praxair Surface Technologies).

No processo de aspersão térmica de arco elétrico, dois eletrodos consumíveis em arame são conectados a uma alta corrente contínua. Ambos os arames são conduzidos até a pistola e se encontram, estabelecendo um arco, que funde a ponta dos dois arames. As partículas fundidas são então atomizadas e propelidas até o substrato através de um jato de ar comprimido. A taxa de aspersão é comandada pela corrente de trabalho, e varia de acordo com o ponto de fusão e condutividade do material do arame. As temperaturas no substrato são muito baixas, já que nenhum gás a alta temperatura é direcionado ao substrato. É um processo com pouca adesão e alta porosidade, devido sua baixa velocidade de aspersão e baixa temperatura. A aspersão por arco elétrico pode também ser realizada utilizando gás inerte ou em uma cabine com atmosfera controlada, o que resultaria em melhores resultados.

O processo de aspersão de plasma pode ser dividido entre o plasma convencional e o plasma a vácuo. O plasma convencional também é chamando de *air plasma spray* (APS). As temperaturas nas regiões de aquecimento da matéria prima em pó ultrapassam significativamente o ponto de fusão de qualquer material, alcançando temperaturas na faixa de 6000 a 15000 °C. Para gerar o plasma, um gás inerte é superaquecido com uma corrente contínua. O gás normalmente utilizado é o argônio, ou mistura entre argônio e hidrogênio. A matéria prima, em pó, é introduzida através de um gás e acelerado até o substrato pelo jato de plasma. A Figura 3-12 mostra esquematicamente o funcionamento de uma pistola de plasma. Como o processo de plasma atinge altas temperaturas, são necessários recursos auxiliares para manter o substrato a baixa temperatura.



Figura 3-12 Esquema de funcionamento de uma pistola de Plasma Spray (Praxair Surfaces Technologies)

O plasma a vácuo, mais conhecido como *Vacuum Plasma Spray* (VPS), utiliza uma câmara a baixas pressões, na faixa de 10 a 50 kPa (0,1 a 0,5 atm). À baixas pressões, a tocha de plasma aumenta seu diâmetro e comprimento. Também são obtidas maiores velocidades do jato de gás. A pouca ausência de oxigênio na câmara de aspersão possibilita a obtenção de revestimentos com menor quantidade de óxidos. A alta temperatura do processo produz revestimentos densos e mais aderentes. O processo de *Cold Spray* pode ser entendido como o processo de deposição de material em que pequenas partículas no estado sólido são aceleradas a altas velocidades (300 a 1200 m/s), e subseqüentemente desenvolve revestimentos em um substrato pelo processo de impacto. Na maioria dos casos, as partículas são aceleradas até altas velocidades através da introdução em um bocal, empregando princípios dinâmicos de gás de convergir/divergir fluxos para desenvolver jato de gás de alta velocidade. O mecanismo pelo qual as partículas no estado sólido deformam e aderem ao substrato e sobre elas mesmas não é bem entendido. No entanto, acredita-se que a alta velocidade de impacto rompe os filmes de óxidos da partícula e da superfície do substrato, pressionando sua estrutura atômica em forte contato entre si, sob momentânea alta pressão e temperatura interfacial. Esta hipótese é consistente pelo fato de que enquanto vários materiais dúcteis, como metais e polímeros, foram aspergidos com sucesso, os materiais frágeis e duros, como os materiais cerâmicos, não podem ser aspergidos sem uma matriz de material dúctil (DYKHUIZEN *et al.*, 1999).

3.2.1 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)

O processo de aspersão térmica por *High Velocity Oxygem Fuel* (HVOF) foi inventado em 1958, porém não se tornou importante comercialmente até década de 1980.

Como no processo de detonação, o processo HVOF possui uma combustão interna confinada, porém trabalha em uma combustão e chama contínua. Trevisan e Lima (2001) explicam que neste processo, o gás combustível é queimado em uma câmara de combustão com oxigênio a alta pressão, obtendo assim um jato de alta velocidade. Porém, além de gás como combustível, utiliza-se a querosene. Entre os gases, são utilizados o propano, propileno, metil-acetileno-propadieno ou hidrogênio. Da câmara de combustão, a chama passa para um tubo (bocal) onde os gases da combustão são acelerados. O resultado desse sistema é uma chama de alta velocidade e alta temperatura. A matéria prima, em pó, é injetada à frente da câmara de combustão. A temperatura da chama funde as partículas e acelera as mesmas à alta velocidade contra um substrato preparado. O resultado deste processo é um revestimento muito denso, com forte adesão à superfície do substrato.

Segundo Crawmer (2004), o alto volume de fluxo de gás, unido à alta temperatura de combustão, cria velocidades do gás na faixa de 1525 a 1825 m/s na saída do bico da pistola.



Figura 3-13 Esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica por HVOF (cedido por Praxair Surfaces Technologies).

As pistolas de HVOF podem ter sua câmara de combustão resfriadas por água ou ar, conforme demonstrado na Figura 3-13, onde é mostrado uma pistola de HVOF refrigerada a água. A injeção de pó pode ser feita axialmente ou radialmente.

Conforme Crawmer (2004), a alta velocidade do gás gerada no processo de HVOF, tem demonstrado uma alta velocidade de aceleração das partículas, o que corresponde a um incremento na densidade e na adesão do revestimento. A temperatura mais baixa da chama, em comparação ao processo de aspersão por plasma, reduz o grau de partículas fundidas e oxidadas. No entanto, mesmo que partículas não fundem totalmente, a alta velocidade de projeção garante a deformação das mesmas, e portanto a adesão e baixa porosidade.

4 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho seguiu a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 4-1.



Figura 4-1 Fluxograma da metodologia utilizada.

4.1 MATERIAIS

Foram aspergidos termicamente três (03) diferentes materiais metálicos sobre corpos de prova de aço inoxidável AISI 304. O substrato não tem influência na caracterização dos revestimentos a que este trabalho propõe. Os revestimentos utilizados são carbonetos de tungstênio e de cromo, e uma liga a base de níquel. A matéria prima destes revestimentos é fornecida em pó para a utilização pelo processo de aspersão térmica por HVOF. Como erodente, utilizou-se como matéria-prima a alumina eletrofundida.

Como comparativo, foram realizados testes em corpos de prova do aço utilizado nos martelos dos moinhos de cominuição da Tractebel.

4.1.1 Aço dos Martelos

O aço dos martelos foi utilizado como comparativo nos experimentos deste trabalho. A composição química deste material foi fornecida pela Tractebel Energia, através de laudo, onde foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X.

O aço dos martelos tem a seguinte composição química (%):

С	Mn	Ni	Cr	Si	Мо	Р	S	Fé
2,8	0,75	0,8	18,0	1,1	0,2	0,025	0,025	Rem.

4.1.2 Carboneto de Tungstênio (WC 12Co)

Este revestimento tem composição nominal de 88% de carboneto de tungstênio e 12% de cobalto (WC 12Co). É um compósito, ou *cermet*, por possuir na sua composição química, um percentual de material cerâmico de WC sobre uma matriz metálica de Co. Seu processo de fabricação se constitui de spray seco e aglomeração. Devido a sua alta dureza, este material é altamente resistente aos desgastes abrasivos, erosivos e deslizantes.

A Tabela 4-1 apresenta os parâmetros de aspersão térmica do WC 12Co, para uma pistola de aspersão térmica de HVOF Tafa JP5000.

Material					
Carboneto de tungstênio – WC 12Co – Woka 3102					
Ítem Parâmetro Valor					
Oxigênio	Pressão	142 psi			
	Fluxo	2000 scfh			
Querosene	Pressão	129 psi			
	Fluxo	6 gal/h			
Câmara	Pressão	101 psi			
Tubo canhão	Comprimento	4"			
Distância de aspersão	Comprimento	255 a 305 mm			
Alimentação de pó	taxa	78 g/min			
Alimentador (nitrogênio)	Pressão	50 psi			
	fluxo	18 scfh			

Tabela 4-1 Parâmetros de aspersão térmica do WC 12Co (Woka 3102) para Tafa JP5000.

4.1.3 Base de Níquel (NiCrBFeSi)

A liga a base de Ni (NiCrBSiFe) é uma liga metálica do tipo *self fluxing*. É obtida através do processo de atomização, e tem forma esférica. Apresenta boa resistência à corrosão e ao desgaste e é utilizável até aproximadamente 820ºC.

Composição química nominal (%):

Cr	Fe	Si	В	С	Ni
17	4	4	3.5	1	Rem.

A Tabela 4-2 apresenta os parâmetros de aspersão térmica do NiCrBSiFe, para uma pistola de aspersão térmica de HVOF Tafa JP5000.

Material					
Liga base de Ni – Praxair 1275H					
Ítem Parâmetro Valor					
Oxigênio	Pressão	210 psi			
	Fluxo	1950 scfh			
Querosene	Pressão	170 psi			
	Fluxo	5,75 gal/h			
Câmara	Pressão	103 psi			
Tubo canhão	Comprimento	4"			
Distância de aspersão	Comprimento	380 mm			
Alimentação de pó	Таха	76 g/min			
Alimentador (nitrogênio)	Pressão	50 psi			
	fluxo	26 scfh			

Tabela 4-2 Parâmetros de aspersão térmica do NiCrBSiFe (1275H) para Tafa JP5000.

4.1.4 Carboneto de Cromo (Cr₃C₂-NiCr)

Este material é composto por 88% de Cr, 8% de Ni e 4% de C. Assim como o WC 12Co, é um *cermet*. É um carboneto de dureza inferior ao carboneto de tungstênio, porém também possui boa resistência a desgaste.

A matéria prima, em pó, apresenta grãos esféricos.

A Tabela 4-3 apresenta os parâmetros de aspersão térmica do Cr₃C₂-NiCr, para uma pistola de aspersão térmica de HVOF Tafa JP5000.

Material					
Carboneto de cromo – Praxair CRC-410-1					
Ítem	Parâmetro	Valor			
Oxigênio	Pressão	142 psi			
	Fluxo	1950 scfh			
Querosene	Pressão	133 psi			
	Fluxo	6,4 gal/h			
Câmara	Pressão	106 psi			
Tubo canhão	Comprimento	8"			
Distância de aspersão	Comprimento	380 mm			
Alimentação de pó	Таха	76 g/min			
Alimentador (nitrogênio)	Pressão	50 psi			
	fluxo	22 scfh			

Tabela 4-3 Parâmetros de aspersão térmica do Cr₃C₂-NiCr (CRC 410-1) para Tafa JP5000.

4.1.5 Alumina Eletrofundida

A Figura 4-2 e a Tabela 4-4 apresentam dados da distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida utilizada neste trabalho como erodente.

A alumina eletrofundida é uma alumina que apresenta elevada densificação, dureza e resistência mecânica, apropriada para o uso como abrasivo e erodentes. Tem como matéria-prima principal o bauxito calcinado que, em mistura com coque de petróleo, ilmenita e cavaco de ferro, sofre um processo de fusão em fornos elétricos especiais. O bloco fundido obtido, após resfriamento adequado, é cominuído a granulometria desejada.



Figura 4-2 Distribuição granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida. O tamanho médio do grão é de 184 µm. (ABCERAM, 2006).

Tabela 4-4 Valores representativos da análise granulométrica por difração a laser da alumina eletrofundida.

Matéria-prima	D10 (µm)	D₅₀ (µm)	D90 (µm)	D _{médio} (µm)
Alumina eletrofundida	94,1	174,7	288,8	184,4

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Fabricação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova a receberem o revestimento metálico foram usinados em aço inoxidável conforme Figura 4-3.



Figura 4-3 Desenho do corpo de prova.

4.2.2 Preparação Superficial

A preparação superficial é de fundamental importância para a melhor aderência do revestimento ao substrato. Consiste, basicamente, da limpeza e geometria da superfície. Foi utilizado o jateamento com óxido de alumínio (alumina eletrofundida) para a limpeza da superfície que recebe o material metalizado. O tamanho de grão do abrasivo é 36 mesh. Esse jateamento tem a função de remover todas as impurezas na superfície, tais como contaminantes inorgânicos e camadas de óxidos. Também tem a finalidade de criar uma rugosidade que proporcione uma melhor ancoragem do revestimento, já que este é o principal mecanismo de aderência do revestimento.

A máquina utilizada para o jateamento abrasivo é a Febratec Tecjato, como demonstrada na Figura 4-4. A pressão utilizada no jato foi de 6 bar, em um bico de 5/16".



Figura 4-4 Máquina de jateamento abrasivo Febratec Tecjato.

4.2.3 Aspersão Térmica por HVOF

A metalização dos corpos de prova foi realizada em um equipamento de aspersão térmica por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) TAFA JP5000. Os parâmetros de aspersão, conforme sugeridos pelos fabricantes de cada material, estão apresentados na Tabela 4-1, Tabela 4-2 e Tabela 4-3. A Figura 4-5 apresenta o equipamento de aspersão térmica pelo processo de HVOF utilizado para revestir os corpos de prova.



Figura 4-5 Equipamentos utilizados na aspersão térmica das amostras: (1) Console e alimentador de pó Tafa/Praxair; (2) Pistola de HVOF Tafa/Praxair.

4.2.4 Caracterização dos Corpos de Prova

4.2.4.1 Avaliação da Porosidade

A avaliação da porosidade é importante para a determinação da densidade real dos revestimentos. Como a densidade teórica é a densidade obtida pela especificação do fabricante da matéria prima, não é considerada a porosidade relativa ao processo de aspersão térmica. A densidade aparente do revestimento é utilizada na determinação da taxa de perda volumétrica nos testes de erosão.

Para a determinação das porosidades nos revestimentos, utilizou-se o método de análise de micrografias através de software de imagens. Para esta análise, foi realizado o seguinte procedimento:

- corte da seção transversal dos corpos de prova;

- embutimento em resina fenólica; tempo de cura de 24h;

 lixamento dos corpo-de-prova em disco diamantado. A seqüência de lixas utilizadas seguiu o tamanho de grão de 30µm e, posteriormente com 15µm;

 polimento com pano de polimento e com pasta de alumina (diâmetro médio de grão igual a 1µm);

- análises e micrografias realizadas no microscópio Olympus BX51M; aumentos utilizados para obtenção das micrografias de 500x e 1000x;

As micrografias obtidas foram digitalizadas para análise. Através do software *Microsoft Office Picture Manager*, as imagens foram preparadas, e posteriormente analisadas no software *Image Tool*. A análise da porosidade no *Image Tool* segue

uma série de processos: transformação da imagem para tons de cinza; transformação da imagem de tons de cinza para imagem binária (o software realiza esta tarefa automaticamente; entende-se como porosidade os tons mais escuros e profundos da imagem); determinação do percentual de preto na imagem. Este percentual é definido como o percentual de porosidade do revestimento.

4.2.4.2 Medição da Microdureza

A determinação da dureza dos materiais envolvidos (erodente e a amostra) é bastante conveniente, visto que alguns autores costumam estabelecer uma relação entre a dureza do material erodido e do erodente. Para se determinar a dureza dos materiais foi utilizado um microdurômetro Micromet 2001 da Buettler. Este equipamento tem capacidade de aplicar cargas que variam de 10 a 500g através de uma pirâmide de diamante sobre a superfície do material. A indentação é medida no microscópio e, em função do seu tamanho e da carga aplicada, o valor da dureza Vickers é lido em uma tabela.

A carga utilizada para obtenção da indentação foi de 500g, com tempo de 15 segundos. Foi obtido a dureza dos revestimentos e do aço dos martelos.

4.2.4.3 Microestrutura

Para a análise microestrutural dos revestimentos dos corpos de prova, foi utilizada microscopia óptica. O aparelho utilizado foi um microscópio Olympus BXS1M. Na microscopia eletrônica de varredura, empregou-se um equipamento Philips XL-20.

4.2.5 Equipamento de Teste

O equipamento de ensaios de desgaste erosivo utilizado atende a norma ASTM G76-95 "Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets".

Este equipamento apresentado na Figura 4-6 é composto por quatro partes principais: i) sistema de pré-aquecimento do ar (1), ii) sistema de alimentação de partículas erodentes (2), iii) sistema venturi-acelerador de partículas (3) e iv) câmara de testes (4).



Figura 4-6 Equipamento para ensaios de desgaste erosivo indicando as partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar; (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) sistema venturi-acelerador de partículas; e (4) e câmara de testes.

4.2.5.1 Sistema de Pré Aquecimento do Ar

Como a temperatura de ensaio utilizada neste trabalho foi a temperatura ambiente, constante, este sistema não foi utilizado.

O sistema de pré-aquecimento do ar tem por objetivo proporcionar o aquecimento e a secagem do ar comprimido que acelera as partículas erosivas até o material alvo. O ar, depois de aquecido neste sistema, é enviado ao início do sistema de aceleração de partículas por um venturi.

4.2.5.2 Sistema de Alimentação de Partículas Erodentes

A alimentação de material erodente é realizada através de um sistema de alimentação especial, onde o material é dosado através de um disco com cavidades de volume definido, e a taxa de alimentação é alterada através da mudança do número de rotações por minuto do disco, através de um inversor de freqüência. A Figura 4-7 mostra o sistema de alimentação empregado nos testes.



Figura 4-7 Sistema de alimentação de partículas erodentes.

4.2.5.3 Sistema Venturi-Acelerador de Partículas

O sistema de aceleração de partículas tem a função de misturar o ar aquecido às partículas erosivas, e acelerá-las até o material alvo. A Figura 4-8 apresenta o sistema de aceleração, que é composto por um venturi, com uma entrada para o ar, e outra para as partículas. O carregamento das partículas só é possível devido ao vácuo produzido pelo venturi, criando um fluxo homogêneo de partículas e ar. A Figura 4-9 mostra um diagrama esquemático do venturi.

O fluxo de partículas erosivas é injetado e acelerado em um tubo longo metálico. A utilização de um tubo com grande comprimento garante que todas as partículas alcancem à mesma velocidade do fluxo de gás.



Figura 4-8 Esquema ilustrativo do sistema de aceleração.

O restante do sistema de aceleração consiste em um tubo metálico de aço inoxidável 316, de 1,6 m e com diâmetro interno de 4,5 mm; permitindo que as partículas se distribuam com maior homogeneidade na corrente de ar comprimido, levando ao o equilíbrio de velocidades das partículas e do ar aquecido. A velocidade do fluxo de ar é controlada através de um sistema de medida de vazão, através de um venturi com tomada de pressão.

No interior da câmara de teste é colocado o corpo-de-prova a ser desgastado.



Figura 4-9 Venturi de aceleração de partículas erosivas.

4.2.5.4 Câmara de Testes

O equipamento é composto por uma câmara de testes com a capacidade de realizar um controle sobre a temperatura do teste (da temperatura ambiente até 1100°C), de um sistema de aquecimento de ar comprimido e de um sistema de aceleração de partículas.

O porta-amostra é fixado externamente na porta do forno, permitindo que os ajustes ao ângulo de ataque possam ser feitos externamente. Assim, o corpo-deprova a ser testado será colocado a uma distância de 10 mm do bico acelerador e com um ângulo ajustável por meio de um goniômetro simples. Abaixo, a Figura 4-10 mostra o interior da câmara de testes.



Figura 4-10 Interior da câmara de testes. Suporte de corpo de prova.

4.2.6 Definição dos Parâmetros de Ensaio

4.2.6.1 Temperatura de Ensaio

Os testes de desgaste erosivo realizados neste trabalho foram feitos à temperatura ambiente, considerando-se 25 ℃.

4.2.6.2 Fluxo de Partículas

O fluxo de partículas erodentes foi controlado pelo sistema do disco dosador, onde o erodente era depositado em quantidades limitadas pelo tamanho das cavidades. O fluxo foi alterado variando-se a velocidade com que o disco dosador girava através de um inversor de freqüências acoplado ao motor.

Alguns autores como Hutchings (1992), Finnie (1960) e Suckling (1995), sugerem fluxos de partículas na ordem de 2 a 10g/min de erodente. Neste trabalho, o fluxo de partículas erosivas foi fixado, e calibrado, para 0,00076 g/mm²s, isto é,

com o tubo acelerador de diâmetro interno de 7,8mm, o fluxo foi da ordem de 8,667g/min.

4.2.6.3 Velocidade de Impacto

Neste trabalho, foi mantida a mesma velocidade de impacto em todos os testes, para qualquer ângulo ou revestimento. A velocidade é controlada pela pressão de ar comprimido no venturi. A velocidade estabelecida para os testes de desgaste erosivo neste trabalho foi de 45 m/s.

4.2.6.4 Tempo de Ensaio

Os revestimentos metálicos aspergidos termicamentes, caracterizam-se por possuir porosidades em sua camada mais superficial. Essa camada, portanto, é mais facilmente e rapidamente desgastada, até atingir uma camada mais densa, onde a taxa de desgaste se estabiliza.

Este tempo de ensaio não pode ser excessivo, para não ultrapassar o revestimento, mas deve ser suficiente para medição da taxa de erosão. Desta forma, realizou-se pré-testes, onde a taxa de erosão era medida a cada parcela de tempo. A Figura 4-11 representa as curvas dos pré-testes realizados. Foi estabelecido então, o tempo de ensaio de 90 minutos, onde para todos os revestimentos, a taxa de erosão se torna uma constante.



Figura 4-11 Pré-teste da taxa de erosão em relação ao tempo nos revestimentos de WC 12Co, NiCrBSiFe e Cr_3C_2 -NiCr

4.2.6.5 Ângulo de Incidência do Erodente

O suporte de corpos de prova está montado no sistema de modo a possibilitar a atuação de incidência do erodente de 10° a 90°. Neste trabalho, foram utilizados os ângulos de incidência de 30°, 60° e 90° para a investigação do desgaste erosivo.

4.2.7 Determinação do Desgaste

A determinação da resistência ao desgaste, conforme norma ASTM G105A, é expressa através da perda de volume do revestimento. Nos testes de desgaste erosivo, os resultados são normalizados pela quantidade de material erodente utilizado. Desta forma, a taxa de alimentação do erodente deve ser a mesma em todos os corpos de prova.

A taxa de desgaste erosivo foi determinada pela perda de volume, a partir da perda de massa, considerando a densidade aparente dos diferentes revestimentos aspergidos investigados. Esta relação é dada pela Equação 4-1. Destaca-se ainda que a perda de volume pode ser um tanto mais precisa que a perda de massa, pois leva em consideração a densidade do material de revestimento. E, uma vez que cada revestimento apresenta densidades diferentes, é interessante determinar o valor real da quantidade de desgaste sofrido para cada material.

$$T_{volume} = \frac{(m_i - m_f)}{\rho_{ap} \times m_e}$$
 4-1

Onde:

 T_{volume} = taxa de erosão volumétrica (cm³alvo/gerodente); m_i = massa inicial da amostra (g); m_f = massa final da amostra (g); m_e = massa de erodente utilizada (g). ρ_{ap} = densidade do revestimento (g/cm³).

As medidas de massa são realizadas após os testes em uma balança digital Sartorius, com resolução de medição de 0,00001g. A perda de volume das amostras é calculada considerando-se que apenas o revestimento sofreu desgaste durante o teste. Os métodos utilizados para o cálculo das incertezas dos resultados apresentados neste trabalho envolvem os erros sistemáticos (método de Kleine e Mc Clintock).

Para o cálculo do erro sistemático, foi utilizado o método de Kleine e Mc Clintock, segundo Marques (2006), onde o erro experimental é função das variáveis medidas conforme a Equação 4.2.

$$\Delta F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial L_1} \cdot \Delta L_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial L_2} \cdot \Delta L_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial L_3} \cdot \Delta L_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial L_n} \cdot \Delta L_n \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$4.2$$

onde:

 ΔF = erro da função calculada;

 $L_1, ..., L_n$ = grandezas medidas;

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 5-1 são apresentados os valores de densidade teórica, porosidade e densidade aparente de cada revestimento estudado. A densidade teórica é obtida através de especificações técnicas dos fornecedores de matéria prima. A densidade aparente considera os valores de porosidades contidas nos revestimentos. A densidade aparente do aço, utilizada para determinação da taxa de erosão volumétrica, foi de 7,86 g/cm³ (CALLISTER, 1996).

Os valores para as porosidades estão próximos dos valores que são geralmente obtidos por revestimentos aspergidos termicamente pelo processo de HVOF. Porém, segundo Riggs (2004), o processo de análise de imagens por *software* é um processo de controvérsia para avaliação de porosidades. Esta controvérsia é causada porque normalmente, dois operadores não concordam exatamente com definições de limites de alguns parâmetros de interesse. Cada operador pode estabelecer diferentes limites no *software* que definem o que são poros na imagem analisada, ou a região que delimita um poro. A controvérsia segue-se porque não há regra que prove quem está correto na análise da porosidade, podendo haver diferentes valores para cada operador gue analisa.

Tabela 5-1 Densidade teórica, porosidade e densidade aparente obtidas nos revestimentos aspergidos e utilizadas no cálculo da taxa de erosão volumétrica.

	Densidade Teórica (g/cm ³)	Porosidade (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)
WC12Co	14,972	1,78	14,7055
Cr ₃ C ₂ -NiCr	6,9145	1,83	6,788
NiCrBSiFe	8,043	2,34	7,8548

Através da densidade aparente definida, calculou-se os valores da taxa de erosão volumétrica, em função da massa de erodente utilizada. A Tabela 5-2 apresenta os dados obtidos, e seu respectivo percentual de erro de medida. Para a medida da velocidade da partícula de erodente, foi calculado um erro de ± 1.3028 m/s, para uma velocidade de 45 m/s.

Em todos os erros calculados, foi utilizado o método de Kleine e Mc Clintock, segundo Marques (2006).

	Ângulo de impacto	Taxa de erosão (cm ³ _{alvo/} g _{erodente}) * 10 ⁻⁶	Erro (%)
	30°	1,695	2,292
WC12Co	60°	1,621	2,560
	90º	1,661	2,457
	30°	4,239	0,736
Cr3C2NiCr	60°	4,885	0,805
	90°	5,727	0,978
	30°	7,575	3,719
NiCrBSiFe	60°	7,307	2,808
	90°	6,719	2,046
	30°	5,319	3,112
Aço	60°	4,936	3,542
	90°	4,457	1,374

Tabela 5-2 Resultados obtidos no teste de erosão para a taxa de erosão volumétrica e o percentual de erro calculado.

A Figura 5-1 apresenta a variação da taxa de erosão volumétrica, por unidade de massa de erodente utilizada, em função do ângulo de incidência das partículas sobre a superfície das amostras. Pelo gráfico desta figura, pode-se observar que o WC 12Co foi o revestimento com menor perda de volume em todos os ângulos de

incidência do erodente estudados e, portanto, com maior resistência ao desgaste erosivo. Por sua vez, o revestimento de NiCrBSiFe apresentou maior desgaste entre os materiais estudados.



Figura 5-1 Variação da taxa de erosão, em perda de volume do material alvo por massa de erodente utilizada, em função do ângulo de impacto.

Em relação ao aço utilizado nos martelos de moinhos de cominuição de carvão, o WC 12Co apresentou ser mais resistente tanto em ângulos de impacto da partícula de 30°, como em 90°. O aço apresentou um desgaste três vezes superior ao desgaste do WC 12Co a 30°. Em baixos ângulos de incidência do erodente, o carboneto de cromo (Cr₃C₂-NiCr) também apresenta melhor desempenho frente ao desgaste erosivo, em relação ao aço. Por outro lado, em ângulos maiores de impacto, o aço apresenta maior resistência do que o Cr₃C₂-NiCr por ser um metal dúctil.

As curvas de variação da taxa de erosão volumétrica do revestimento de NiCrBSiFe e do aço são curvas típicas de materiais metálicos dúcteis, em que as maiores taxas de erosão acontecem quando temos ângulos menores de incidência das partículas de erodente. Em contraste a estes casos, a curva de taxa de erosão do Cr₃C₂-NiCr apresentou, nos menores ângulos de impacto do erodente, maior resistência ao desgaste erosivo, enquanto que, a medida que o ângulo de incidência das partículas aumenta, maior é o desgaste. Este comportamento é característico dos materiais frágeis. O WC 12Co também é um revestimento com características de material frágil, porem não apresentou este comportamento na curva devido à sua alta resistência ao desgaste erosivo. Possivelmente, com o aumento do tempo de teste, o aumento de desgaste em função do aumento do ângulo de incidência das partículas erosivas poderia ser observado neste caso.

Na Figura 5-2 pode-se observar o revestimento de WC 12Co antes e depois do teste de desgaste erosivo. A imagem foi obtida através da microscopia eletrônica de varredura, e o aumento utilizado foi de 1500 vezes.



Figura 5-2 Revestimento de WC 12Co, antes e depois de erodido (90°). Aumento de 1500x.

A superfície, antes da erosão, apresenta porosidades superficiais (conforme indicado na Figura 5-2) características de um revestimento sem acabamento superficial. Assim que desgastada essa primeira camada do revestimento, as partículas erosivas encontram uma camada mais densa. A Figura 5-2 ainda apresenta um possível fragmento de uma partícula de alumina eletrofundida presa ao revestimento após teste de erosão.

A Figura 5-3 apresenta o desgaste erosivo no WC 12Co nos ângulos de impacto da partícula de 30° e 90°. Os detalhes dos círculos em vermelho são apresentados na Figura 5-4, com uma ampliação de 1500 vezes. A imagem mostra

o mecanismo de desgaste erosivo de fratura frágil, típico de materiais frágeis como os cerâmicos. O mecanismo de degradação frágil, conforme visto anteriormente no Capítulo 3, se dá por formação de trincas nos contornos de grão, e consequentemente, pela formação de "*pits*" de erosão. Esses "pits" de erosão são destacados na Figura 5-4 pelas setas.



Figura 5-3 Desgaste erosivo no revestimento de WC 12Co, para os ângulos de incidência do erodente de 30° e 90°. Aumento de 800x.



Figura 5-4 Detalhe do mecanismo de fratura frágil no revestimento de WC 12Co, para os ângulos de 30° e 90°. Aumento de 1500x.

Na Figura 5-5 é apresentado a imagem da superfície do NiCrBSiFe após desgaste erosivo, para os ângulos de impacto do erodente de 30° e 90°. Os detalhes circulados em vermelho são apresentados com ampliação de 1500 vezes na Figura 5-6.



Figura 5-5 Desgaste erosivo no revestimento de NiCrBSiFe, para os ângulos de incidência do erodente de 30° e 90°. Aumento de 800x.



Figura 5-6 Detalhe do mecanismo de deformação plástica no revestimento de NiCrBSiFe, para os ângulos de 30° e 90°. Aumento de 1500x.

Analisando a Figura 5-6, percebe-se predominantemente o mecanismo de desgaste erosivo de deformação plástica. No ângulo de impacto de 30°, onde este revestimento apresentou maior taxa de erosão volumétrica, observa-se que a deformação plástica ocorre pelo mecanismo de corte. Quando a partícula atinge o
revestimento de NiCrBSiFe com um ângulo de 90°, a imagem mostra que prevalece o desgaste por sulcamento. Hoppert (1989) sugere que materiais dúcteis, como metais, o desgaste erosivo ocorre preferencialmente através da deformação plástica, por sulcamento ou corte a partir da superfície.

A superfície desgastada do Cr₃C₂-NiCr é mostrada na Figura 5-7, com aumento de 800 vezes. A superfície da imagem foi submetida ao impacto da alumina eletrofundida no ângulo de 90°. A imagem apresenta mecanismos de desgaste tanto de fratura frágil como por deformação plástica. A Figura 5-8 apresenta uma ampliação do detalhe da Figura 5-7, com aumento de 3000 vezes.



Figura 5-7 Superfície do revestimento de Cr₃C₂-NiCr com incidência das partículas erodentes de 90°. Aumento de 800x.

Na Figura 5-8, é possível ver detalhadamente o mecanismo de desgaste de fratura frágil e de deformação plástica. Como o Cr₃C₂-NiCr é um revestimento

compósito, com grande presença de matriz metálica, é natural a presença dos dois mecanismos de desgaste erosivo atuando juntos. A deformação plástica se apresenta predominantemente pela formação de sulcos. A presença da matriz metálica possibilita a presença de mecanismos de sulcamento e corte. Segundo Ludema (1996), este tipo de material compósito desgasta primeiramente em sua fase metálica dúctil, enfraquecendo a sustentação da fase frágil, até rompe-la.



Figura 5-8 Detalhe da ocorrência de desgaste por fratura frágil e por deformação plástica no revestimento de Cr3C2-NiCr, com angulo de impacto da partícula de 90°. Aumento de 3000x.

O aço utilizado nos martelos dos moinhos de cominuição de carvão apresentara predominância de desgaste erosivo por deformação plástica. Porém, é notada a presença de perdas por fratura frágil, assim como demonstrado na Figura 5-9. A maior taxa de erosão neste aço ocorreu quando o ângulo de incidência das partículas era de 30°. Isto comprova, tanto através da imagem quanto pelo teste realizado, que este aço possui características de um metal dúctil.



Figura 5-9 Superfície do aço dos martelos, submetida ao desgaste erosivo por impacto de partícula sólida a 90°. Aumento de 1500x.

A Tabela 5-3 apresenta a microdureza dos materiais pesquisados. A microdureza foi obtida através da média de oito medições. A Tabela 5-3 ainda expõe o desvio padrão das medidas obtidas. Os desvios padrão, nos revestimentos, apresentam valores maiores em comparação ao aço. Este fato ocorre possivelmente como resultado de descontinuidades e porosidades mais presentes nos revestimentos aspergidos do que no aço.

Pela Tabela 5-3, pode-se observar que o carboneto de tungstênio é o revestimento de maior dureza, apresentando dureza de 1086 HV. Os demais revestimentos testados apresentaram durezas inferiores ao aço dos martelos dos moinhos. O NiCrSBiFe foi o revestimento que demonstrou menor dureza, de 569 HV.

O Cr₃C₂-NiCr, mesmo demonstrando ter uma dureza bem inferior ao do aço, apresentou igual resistência à erosão no ângulo de 60°, e até maior resistência que o aço no ângulo de 30°. Este comportamento expõe que existem outros fatores que influenciam na resistência ao desgaste. O aço é um material mais dúctil que o Cr₃C₂-NiCr, e por isso deve ser mais suscetível ao desgaste erosivo em pequenos ângulos.

	Microdureza Vickers (HV)	Desvio Padrão
WC12Co	1086	144
Cr ₃ C ₂ -NiCr	649	116
NiCrBSiFe	569	71
Aço	797	44

Tabela 5-3 Valores de dureza, medidos em Vickers, aplicando carga de 500g, e desvio padrão para cada material estudado.

A Figura 5-10 representa a taxa de erosão volumétrica em função da dureza dos materiais. A curva de tendência demonstra que a dureza está relacionada à resistência à erosão. O NiCrBSiFe foi o material que apresentou menor dureza, e maior taxa de erosão volumétrica. Por outro lado, o WC 12Co é o revestimento de maior dureza, e demonstrou ter maior resistência ao desgaste erosivo entre os materiais estudados. Porém, a dureza não é fator dominante na taxa de erosão. Segundo alguns autores, como Hutchings (1992) e Finnie (1995), outras propriedades mecânicas do material alvo estão relacionados à taxa de erosão, como a morfologia, porosidades, tamanho de grão, nível de tensões, etc.



Figura 5-10 Taxa de erosão volumétrica em função da dureza dos corpos de prova investigados em ângulos de incidência do erodente de 30, 60 e 90º.

6 CONCLUSÃO

O revestimento de WC 12Co foi o material que demonstrou melhor desempenho frente ao desgaste erosivo em todas as condições de teste estudadas, sendo que apresentou uma resistência de no mínimo 2,5 vezes superior ao do aço utilizado nos martelos dos moinhos.

O aço dos martelos e o revestimento de Cr_3C_2NiCr apresentaram a mesma taxa de erosão para o ângulo de incidência de 60°. Porém demonstraram ter comportamento opostos nos ângulos de 30° e 90°, devido suas diferentes características: o aço é um metal dúctil, e o Cr_3C_2NiCr é um material frágil.

O revestimento de NiCrBSiFe apresentou maior taxa de erosão em todos os ângulos estudados

Observou-se que há uma relação entre a dureza destes materiais e a taxa de desgaste erosivo dos mesmos. Isto pode ser constatado porque as condições de ensaios de desgaste foram iguais para todos os materiais estudados. O revestimento de maior dureza apresentou maior resistência ao desgaste.

Os revestimentos, por serem materiais compósitos, apresentaram mecanismos diferenciados de degradação. Nas ligas Cr₃C₂NiCr e WC-12Co houve predominância do processo frágil de degradação, devido à quantidade de material cerâmico que compõem a matriz do revestimento. Na liga NiCrBSiFe e no aço dos martelos do moinho, o processo foi predominantemente dúctil sendo que em ângulo de 30º houve maior degradação por corte e em ângulos de 60º e 90º houve a formação de sulcos o que caracteriza a erosão de materiais metálicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABCERAM, Disponível em http://www.abceram.org.br/asp/abc_54.asp. Acesso em: 19 de mar. 2006.
- ANAND, K., HOVIS, S.K., CONRAD, H., SCATTERGOOD, R.O., Flux effects in solid particle erosion, Wear 118, 243, 1987.
- ASTM G40-92, Annual Book of ASTM Standards, Vol.3, 02, p.160, 1992.
- ASTM G76-95 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. vol. 03.02, wear and erosion; metal Corrosion, ASTM-100, 1996.
- BALL, A.; The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials, J.S. Afr. Inst. Min. Metall., v.86, n. 1, p.1 1, Jan. 1986.
- BERGMANN, C.P., SILVEIRA, M.M., MADRUGA, T.P., **Resistência ao desgaste de aluminas**, Anais do 38º congresso brasileiro de cerâmica, v.1, p.198-203, 1994.
- CALLISTER Jr., W. D. Materials Science and Engineering: an Introduction. Department of Metallurgical Engineering. The University of Utah. 4th Ed. Salt Lake City, Utah 1996.
- CRAWMER, D.E. Introductions to coatings, equipament and theory. Handbook of Thermal Spray Technology, p. 43 46, 2004.
- DALLAIRE, S. Hard arc-sprayed coating with enhanced erosion and abrasion wear resistance, Thermal Spray – Surface Engineering via Applied Research, p. 575-582, 2000.
- DYKHUIZEN, R.C., SMITH, M.F., GILMORE, D.L., NEISER, R.A., JIANG, X., SAMPATH, S. Impact of High Velocity Cold Spray Particles. Thermal Spray Tecnologies. Vol. 8 (No. 4), p. 559 564, 1999.

FINNIE, I., Erosion of surfaces by solid particles, Wear 3, p.87 – 103, 1960.

- FINNIE, I., Some reflections on the past and future of erosion, Wear, 186-187, p.1-10, 1995.
- GOODWIN, J.E., SAGE, W., TILLY, G.P., **Proc. Inst. Of Mech. Eng**, 184, p.279, 1969-70.
- GORDON ENGLAND, Disponível em <http://www.gordonengland.co.uk> Acesso em: 3 de maio de 2006.
- HAMMIT, E.N., McELROY, W. D., WH ITELEY, A.H., On Cavity Formation in Water. J. App. Physics, v.18, n. 2, p.167 172, 1947.
- HAWK, J. A., WILSON, R. D., TYLCZAK, J. H., DOGAN, Ö. N., Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, Wear abrasive, nº 225-229, p.1031-1042, 1999.
- HERMAN, H., SAMPATH, S. **Thermal spray coatings.** New York, [ca. 2000]. Disponível em <http://www.matscieng.sunysb.edu/tsl/thermal/article1.html>. Acesso em 30 mar. 2006.
- HOPPERT, S., Alumina ceramics: superior materials for protection against wear and corrosion. Alemanha: Siegburg, p.3 11, 1989.
- HOPPERT, S., Alumina oxide ceramic for wear protection in mineral processing, Siegburg, Alemanha, p.3 10, 1990.
- HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
- HUTCHINGS, I.M., Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals, Wear, p.393 427, 1979.
- HUTCHINGS, I. M., Deformation of metal surfaces by the oblique impact of square plates, Int. J. Mech. Sci. 19, p. 45–52, 1977.

- KULU, P., HUSSAINOVA, I., VEINTHAL, R. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings. Wear 258 p. 488–496, 2005.
- KUSHNER, B.A., NOVINSKI, E.R., **Thermal Spray Coatings, Friction, Lubrification, and Wear technology.** Vol 18, ASM Handbook, ASM International, p. 829-833, 1992.
- LEVY, A.V., Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials, ASM international, Materials Park, Ohio, USA, 1995.
- LIMA, C.C., TREVISAN, R. Aspersão Térmica: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Artliber, 2001.
- LUDEMA, K.C. Friction, Wear, Lubrification: a Textbook in Tribology. Florida: CRC Press, 1996.
- MARQUES, C.M. Relação entre microestrutura e desgaste erosivo a frio e a quente em materiais cerâmicos à base de alumina. 2006. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, UFRGS, 2006.
- MARQUES, P. V. **Aspersão térmica.** Minas Gerais, 2003. Disponível em http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>. Acessado em 22 fev. 2006.
- MCCUNE, R.C., PAPYRIN, A.N., HALL, J.N., RIGGS, W.L., ZAJCHOWSKI, P.H., An Exploration of the cold gas-dynamic spray method for several materials systems, Advances in Thermal Spray Technology, ASM International, p. 1-6, 1995.
- MONTGOMERY, J.E., CLARKE, J.M., SAE Summer Meetings, New York, paper 538A, 1962.
- RIGGS, W. Metallography and image analysis, Handbook of Thermal Spray Technology, p. 224 259, 2004.

SHEWMON P., AND SUNDARARAJAN G., Ann. Rev. Mater. Sci 13, p.301. 1983.

SUCKLING, M., ALLEN, C., The design of an apparatus to test wear of boiler tubes, Wear, 186-187, p.266 – 272, 1995.

- SUCKLING, M., ALLEN, C., Criticals variables in high temperature erosive wear, Wear, 203-204, p.528-536, 1997.
- SUNDARARAJAN, G., ROY, M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, Tribology international, Vol 30. no.5, p.339-359, 1997.
- TAKIMI, A. S.; VILLANOVA, D. L.; VICENZI, J.; LIMA, M. D.; MARQUES, C. M.; BERGMANN, C. P, **Revestimentos protetores aplicados por hvof:** estudo comparativo da resistência à erosão a quente por cinzas de carvão mineral. INFOMET, 01 nov. 2003.
- WANG, B.Q., LEE, S.W., Elevated temperature erosion of several thermalsprayed coatings under the simulated erosion condition of in-bed tubes in a fluidized bed combustor, Wear, p.580 -587, 1997.
- WHEELER, D.W., WOOD, R.J.K., Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves. Wear 258, p. 526-536, 2005.
- ZHOU, J.R., BAHADUR, S., **SEM studies of material damage in alumina** ceramics by angular, single and multiple particle impacts, wear, 162-164, p.285-295, 1993.