**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

**Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets
Depositados pelo Processo HVOF e do Cromo Duro
Eletrolítico**

USP/IFSC/SBI

de

8-2-001679

RAFAEL NUCCI

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Assoc. Dr. Luiz Carlos Casteletti

São Carlos

2005

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA
INFORMACÃO

Nucci, Rafael

“Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico” Rafael Nucci – São Carlos, 2005

Dissertação (Mestrado) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2005 – páginas: 76

Área: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti

1. Desgaste de Cermets

1. Título

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RAFAEL NUCCI, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 11/05/2005.

COMISSÃO JULGADORA:

LC Casteletti

Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti (Orientador e Presidente) – EESC/USP

CBolfarini

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini – UFSCar

LCCanale

Profa. Dra. Lauralice de Campos Franceschini Canale – EESC/USP

A meus pais, Luis e Eliane.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Luiz Carlos Casteletti, pela orientação, pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

A empresa Ogramac, seus funcionários e amigos que colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
I - INTRODUÇÃO.....	1
II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
II.1 - Processo de aspersão térmica.....	6
II.1.1 - Aspersão térmica por chama oxiacetilênica	8
II.1.2 - Aspersão por arco elétrico	9
II.1.3 - Plasma de arco não transferido	10
II.1.4 - Plasma de arco transferido	11
II.1.5 - O processo de aspersão HVOF	12
II.2 - Processo de cromo duro eletrolítico.....	15
II.3 - O processo de desgaste	16
II.3.1 - Tipos de desgaste	16
II.3.2 - Classificação de desgaste por abrasão	19
II.3.3 - Fatores que afetam o desgaste abrasivo	20
II.3.4 - Ensaios de desgaste abrasivo	24
III - MATERIAIS E MÉTODOS	31
III.1 - Revestimentos dos corpos de prova.....	32
III.2 - Preparação dos corpos de prova revestidos por HVOF para análises metalográficas.....	34
III.3 - Preparação do corpo de prova com cromo duro para análise metalográfica	34
III.4 - Análise Micrográfica e de Porosidade	34
III.5 - Ensaios de microdureza.....	35
III.6 - Determinação da densidade real dos revestimentos depositados.....	35

III.7 - Difração de Raios-X	36
III.8 - Ensaio de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha conforme a norma ASTM G 65-94.....	36
III.9 - Ensaio de desgaste abrasivo para carbonetos sinterizados, conforme a norma ASTM B 611-96 modificada	38
III.10 - Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo ("Calotest").....	40
III.11 - Microscopia eletrônica de Varredura (MEV).....	41
IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
IV.1 - Análise Metalográfica e de Porosidade	42
IV.2 - Ensaio de microdureza	44
IV.3 - Determinação das densidades reais dos revestimentos depositados.....	46
IV.4 - Difração de Raios-X.....	47
IV.5 - Ensaio de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha conforme a norma ASTM G 65-94	52
IV.6 - Ensaio de desgaste abrasivo a alta tensão (ASTM B 611 modificado).....	56
IV.7 - Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo.....	62
V – CONCLUSÕES	70
VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

Lista de Figuras

Figura 01 - Esquema do processo de aspersão térmica ^[7]	7
Figura 02 – Processo de aspersão térmica HVOF em operação.....	15
Figura 03 - Descrição esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste.....	17
Figura 04 - Distinção esquemática entre abrasão a dois corpos e a três corpos	20
Figura 05 - Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal	21
Figura 06 - Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo	22
Figura 07 - Velocidade de desgaste em função do tamanho do abrasivo	23
Figura 08 - Diagrama esquemático mostrando (a) equipamento e (b) detalhes da interface de contato entre corpo de prova e alimentação do abrasivo.....	26
Figura 09 - Modelo esquemático mostrando (a) a área de interação e (b) uma visão detalhada.....	28
Figura 10 - Representação gráfica do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo a baixa tensão.....	29
Figura 11 - Representação gráfica do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo de carbonetos	30
Figura 12 – Fluxograma do procedimento experimental	32
Figura 13 - Computador Macintosh Power PC 8500 , Microscópio Axiotech da Carl Zeiss.....	35
Figura 14 – Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha.....	37
Figura 15 - Fotomicrografia do abrasivo quartzo utilizado no ensaio de desgaste, obtida por microscopia eletrônica de varredura.....	37
Figura 16 – Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste abrasivo, conforme ASTM B 611.....	39

Figura 17 - Fotomicrografia do abrasivo alumina utilizado no ensaio de desgaste abrasivo, obtida por microscopia eletrônica de varredura.....	39
Figura 18 – Equipamento utilizado no ensaio tipo “calotest”	41
Figura 19 - Fotomicrografia do abrasivo utilizado no ensaio de desgaste micro abrasivo (Buehler Ltd)	41
Figura 20 - Fotomicrografia da secção transversal do revestimento de WC-CoCr	43
Figura 21 - Fotomicrografia da secção transversal do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	43
Figura 22 - Foto micrografia da secção transversal do revestimento de cromo duro	44
Figura 23 - Difratoograma de raios-x do pó de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	48
Figura 24 - Detalhe do pó utilizado para aspersão do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtido via MEV.....	49
Figura 25 - Difratoograma de raios-x do pó de WC-CoCr	49
Figura 26 - Detalhe do pó utilizado para aspersão do revestimento de WC-CoCr, obtido via MEV.....	50
Figura 27 - Difratoograma de raios-x do revestimento de WC-CoCr	50
Figura 28 - Difratoograma de raios-x do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	51
Figura 29 - Difratoograma de raios-x do revestimento de cromo duro.....	51
Figura 30 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM G 65-94 procedimento A, para os três revestimentos analisados.....	52
Figura 31 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste.....	54
Figura 32 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste	54

Figura 33 - Detalhe da superfície da liga $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste.....	55
Figura 34 - Detalhe da superfície da liga cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste.....	55
Figura 35 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM B 611 com procedimento 1 modificado, para os três revestimentos analisados.	57
Figura 36 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.....	58
Figura 37- Detalhe da superfície da liga $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.....	58
Figura 38- Detalhe da superfície da liga Cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.....	59
Figura 39 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM B 611 com procedimento 1 e 2 modificados, para o revestimento WC-CoCr.....	60
Figura 40 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 2.....	61
Figura 41 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, após ensaio de desgaste abrasivo, conforme procedimento modificado 1.	61
Figura 42 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, após ensaio de desgaste abrasivo, conforme procedimento modificado 2.	62
Figura 43 - Gráfico de perda de volume x distância do ensaio “calotest” para os três revestimentos estudados.....	63
Figura 44 - Calota sobre o revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo “calotest”.....	63

Figura 45 - Detalhe da superfície do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo “calotest”	64
Figura 46 - Calota sobre o revestimento de WC-CoCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo “calotest”	64
Figura 47 - Detalhe da superfície do revestimento WC-CoCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo “calotest”	65
Figura 48 - Calota sobre o revestimento de cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo “calotest”	65
Figura 49 - Detalhe da superfície do revestimento de cromo duro, obtida por MEV, após ensaio de desgaste tipo “calotest”	66
Figura 50 - Esquema representativo proposto para o contato entre esfera e revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}^{[42]}$	67
Figura 51 - Coeficiente de desgaste k, conforme ensaio, para as três composições estudadas.	69

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Composições químicas nominais dos materiais estudados.....	31
Tabela 02 – Parâmetros de aplicação do material WC-CoCr.....	33
Tabela 03 – Parâmetros de aplicação do material Cr_3C_2 -NiCr.....	33
Tabela 04 - Valores de porosidades obtidos pela análise dos revestimentos.	44
Tabela 05 - Valores de microdurezas obtidos nos revestimentos estudados.....	45
Tabela 06 - Resultados das análises de picnometria realizadas nos revestimentos.....	46
Tabela 07 – Parâmetros para os ensaios conforme procedimentos modificados 1 e 2.	56

RESUMO

NUCCI, R. (2005). Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico. São Carlos, 2005. 76p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Desgaste é um dos três principais problemas industriais comumente encontrados, que levam à substituição de componentes e equipamentos em engenharia. A possibilidade de se recuperar esses componentes, ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho, é constantemente estudada e novas técnicas são propostas, sempre no sentido de aumentar a vida útil e reduzir custos operacionais. Esta é a razão para o aumento da importância dos sistemas de revestimentos. O cromo duro eletrolítico tem sido muito utilizado para conferir resistência ao desgaste e/ou à corrosão, porém as características do processo de deposição eletrolítica do mesmo, com a presença do cromo hexavalente, altamente cancerígeno, têm resultado numa limitação crescente ao seu uso. Devido a isso se tornou necessário o desenvolvimento de novos revestimentos alternativos menos agressivos. Os substitutos mais promissores são os “cermets” depositados pelo processo HVOF, que foram produzidos no presente trabalho e comparados com o cromo duro eletrolítico quanto à resistência ao desgaste.

Os revestimentos obtidos foram caracterizados por meio de ensaios micrográficos óticos, eletrônicos, raios-x, densidade e ensaios de desgaste dos seguintes tipos: roda de borracha e areia a seco, ensaio abrasivo para carbonetos e micro-abrasivo.

O revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresentou desempenho geral inferior ao do cromo duro. Entretanto no caso do desgaste micro-abrasivo, onde o mecanismo de desgaste apresentado no mesmo foi misto adesivo-abrasivo, ao contrário dos demais que tiveram características abrasivas, sua resistência ao desgaste foi superior a dos demais. O revestimento constituído de WC-CoCr apresentou o melhor desempenho entre todos os avaliados, o que o indica como um candidato altamente promissor à substituição do cromo.

Palavras-Chave: Aspersão Térmica, HVOF, Cromo Duro, Desgaste

ABSTRACT

NUCCI, R. (2005). Evaluation of Wear Resistance of Cermets Deposited by HVOF and Electroplated Hard Chrome. São Carlos, 2005. 76p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Wear is one of the three main industrial problems, that causes the substitution of components and equipments in engineering. The possibility to recover those components or to prepare them to better support the work conditions is constantly studied and new techniques are proposed, always seeking to increase the life span and to reduce operational costs. This is the reason why the coating systems are important. The hard chrome coatings has been traditionally used to improve wear resistance and/or corrosion resistance. However the characteristics of the electroplated deposition process, with the presence of the hexavalente chrome, highly cancerous, result in a growing limitation to its use. Due to that it become necessary the development of new less aggressive alternative coatings. The most promising substitutes are the "cermets" deposited by the HVOF process that were produced in the present work and compared with electroplated hard chrome coatings for wear resistance.

The obtained coatings were characterized through optical and electronic micrographics analysis , x-ray, density and submitted to the following types of wear tests: Dry Sand / rubber wheel , Wear test for cemented carbides and micro-abrasive wear test.

The coating $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ presented smaller general performance in comparison with the hard chrome. However, in the case of the micro-abrasive wear, where the wear mechanism presented was mixed adhesive-abrasive, unlike the others that had only abrasive characteristics, the resistance to the wear was superior. The WC-CoCr coating presented the best performance overall, what indicates it as a candidate to the hard chrome substitution.

Key-Word: Thermal Spray, HVOF, Hard Chrome, Wear

I - INTRODUÇÃO

O grande desafio nos modernos processos de engenharia consiste no desenvolvimento de soluções que reduzam os custos de fabricação de um determinado produto ou equipamento, aumente sua confiabilidade em funcionamento, estabelecendo prazos maiores e mais conhecidos para sua manutenção e que atendam as necessidades de proteção ambiental.

O desgaste é um dos três principais problemas industriais comumente encontrados, que levam à substituição de componentes e equipamentos em engenharia; os outros dois são fadiga e corrosão. O processo raramente é catastrófico, porém reduz a eficiência de operação pelas perdas crescentes de potência, aumento de consumo de óleos lubrificantes, energia e também pela substituição de componentes. A área de manutenção das indústrias luta constantemente contra o desgaste de forma a aumentar o tempo entre as paradas de manutenção e redução das substituições. A possibilidade de se recuperar esses componentes, ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho, é constantemente estudada e novas técnicas são propostas, sempre para aumentar a vida útil e reduzir custos operacionais. O desgaste apresenta, portanto, considerável significado econômico.

Tomando-se como base as características funcionais de um par tribológico, as ações para a proteção ao desgaste estão diretamente relacionadas à superfície do material. Esta é a razão para o aumento da importância dos sistemas de revestimentos. Desta forma o desenvolvimento e aperfeiçoamento de revestimentos contra desgaste e a sua seleção para usos específicos requerem a caracterização

do comportamento do material sob os parâmetros tribológicos relevantes.^[1] Como vantagens dos revestimentos pode-se mencionar:

- reparabilidade dos revestimentos e recuperação de peças;
- peças em materiais de baixo custo ou baixo peso específico podem ser utilizadas juntamente com revestimentos resistentes ao desgaste;
- propriedades desejáveis, como resistência à corrosão, podem ser obtidas por revestimentos.

Nos setores químico e petroquímico o aumento da demanda produtiva e a agressividade dos produtos processados requerem o uso de materiais que atendam às condições de ciclagem térmica, abrasão, erosão e corrosão, aos quais são submetidos os equipamentos. Os processos de revestimentos permitem a seleção de uma vasta gama de materiais adequados a estas condições.

Vários processos de revestimentos e materiais têm sido desenvolvidos a fim de atender essas necessidades, dentre eles os processos de aspersão térmica; PVD (Physical Vapor Deposition); CVD (Chemical Vapor Deposition); cromo duro eletrolítico, entre outros.

Historicamente, um dos revestimentos mais utilizados industrialmente para conferir resistência ao desgaste e/ou à corrosão é o cromo duro eletrolítico. Porém, as características do processo de deposição eletrolítica do mesmo, com a presença do cromo hexavalente, altamente cancerígeno, têm resultado numa limitação crescente ao seu uso. Devido a isso se tornou necessário o desenvolvimento de novos revestimentos alternativos menos agressivos. Os substitutos mais promissores são os “cermets” depositados pelo processo HVOF (High Velocity Oxy Fuel).

O objetivo do presente trabalho consistiu na produção e na comparação de desempenhos quanto ao desgaste, de camadas de “cermets” produzidas pelo

processo HVOF, com camadas constituídas de cromo duro, visando a uma eventual substituição.

II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O revestimento de materiais submetidos à fricção e possivelmente desgaste ou corrosão ou ambos torna-se necessário em muitas situações de uso. O revestimento deve ser escolhido conforme a demanda tribológica do meio e atualmente dispõe-se de uma ampla faixa de materiais e processos para atenderem os requisitos necessários. Por meio de processos de revestimento, como os por aspersão térmica, obtêm-se a diminuição do desgaste e da corrosão, prolongando-se grandemente a vida útil de equipamentos, pelo uso de materiais de alto desempenho, sobre um metal base de baixo custo ^[2]. As áreas de aplicação dos processos de revestimentos podem ser categorizadas conforme a seguir conforme a demanda:

- Resistência ao desgaste;
- Resistência à oxidação;
- Resistência à corrosão;
- Recuperação de dimensional;
- Barreiras térmicas;
- Resistividade ou condutibilidade elétrica;
- Biomédica.

Diversos processos de revestimento foram criados a fim de atender tais demandas. São listados em seguida os vários processos de revestimentos utilizados:

- PVD (Physical Vapor Deposition);
- CVD (Chemical Vapor Deposition)
- Níquel químico (electroless)
- Polímeros (teflon, eva, nylon)
- Revestimentos orgânicos (tintas e vernizes)
- Eletrodeposição (cromo duro, cromo decorativo, cobreamento)
- Soldagem
- Imersão a quente ou imersão em banho fundido
- Deposição por explosão e colaminação (Clading)
- Cold Spray

- Aspersão térmica
 - Plasma de arco transferido ou não transferido
 - Plasma spray
 - D gun
 - Arco elétrico
 - Oxi acetileno pó (com e sem fusão posterior)
 - Oxi acetileno arame
 - HVOF (High Velocity Oxy Fuel)
 - HVOF (High Velocity Air Fuel)

- Tratamentos termoquímicos
 - Nitretação
 - Cementação
 - Boretação

Dentre os vários processos, destaca-se o de aspersão térmica devido as seguintes características:

- Facilidade de preparação de grandes peças com geometria complicada, baixo custo e altas taxas de deposição de material ^[3].
- Possibilidade de se revestir componentes e peças no próprio local de trabalho com pouca ou nenhuma desmontagem dos componentes.
- Possibilidade de aplicação de diversos tipos de materiais como cerâmicas, metais, "cermets" ou polímeros com baixo aporte de calor na peça revestida ^[2, 4].

II.1 - Processo de aspersão térmica

Aspersão térmica é o termo genérico usado para o conjunto de processos de recobrimentos nos quais o material de revestimento é aquecido ou fundido rapidamente por meio de combustão, arco elétrico ou plasma, e simultaneamente projetado por gases sob pressão a altas velocidades sobre um substrato preparado ^[5]. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base ou sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica. Estas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade, apresentando uma estrutura diferente dos obtidos pelos demais processos de revestimentos metálicos ^[6]. Na figura 1 é mostrado um esquema simplificado do processo de aspersão térmica.

Figura 01 - Esquema do processo de aspersão térmica ^[7].

Uma grande quantidade de materiais incluindo a maioria dos metais e suas ligas, materiais cerâmicos, carbonetos, boretos e hidretos, sob forma de pó ou arame, podem ser depositados por aspersão térmica. Os processos de aspersão térmica, são classificados em função dos métodos de geração de energia. As fontes mais utilizadas são: energia elétrica ou combustão de gases ^[8].

A técnica apresenta um longo histórico, tendo se iniciado com trabalhos realizados no final do século XIX. A primeira aplicação industrial é atribuída a Schoop, na Suíça, que em 1910 desenvolveu dispositivo para fundir zinco e estanho, e projetar o metal fundido por meio de ar comprimido ^[5].

Em 1940, foi desenvolvido um novo tipo de pistola que utilizava o calor gerado por um arco voltaico entre as pontas de dois arames para a fusão do metal do revestimento. O desenvolvimento da técnica de aplicação por arco a plasma e também da técnica de deposição de pó por detonação, ocorreu no final da década de 50. No início dos anos 80, foi desenvolvido o processo de aspersão oxicomustível de alta velocidade conhecido como HVOF (High Velocity Oxi-Fuel) ^[9]. A partir da década de 90, ocorreu um grande avanço na indústria de equipamentos e de materiais para aspersão térmica e, o principal objetivo era produzir equipamentos em que a velocidade das partículas aspergidas fosse cada vez maior, bem como a utilização de gases de transporte que não contaminassem

ou oxidassem as partículas após a fusão. As necessidades tecnológicas e econômicas atuais têm contribuído para que o processo de aspersão térmica apresente uma fase de desenvolvimento acelerado em diversos países. O processo que era utilizado inicialmente para a proteção contra a corrosão, usando na maioria dos casos materiais de baixos pontos de fusão como o zinco, teve seu uso bastante difundido para outros campos de utilização; com a evolução das técnicas de aplicação como por exemplo, a utilização de materiais cerâmicos, cermets, (carbonetos + metais), aços inoxidáveis, Al, ligas de Ni e ligas de Co [8].

São apresentados resumidamente em seguida os vários processos de aspersão disponíveis.

II.1.1 - Aspersão térmica por chama oxiacetilênica

Esta técnica utiliza o calor gerado pela combustão de uma mistura de gases (oxigênio-acetileno ou oxigênio-propano) para fundir o material de deposição. Acetileno é o gás combustível mais utilizado pelo processo de aspersão à chama devido a alta temperatura da chama oxigênio-acetileno (3100°C). Os materiais para revestimento são fornecidos sob a forma de pó ou arame e podem ser metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos e alguns plásticos ^[9]. As pistolas de aspersão com alimentação a pó ou arame são equipamentos simples, compactos e de baixo custo. No caso da utilização de pó, a chama é utilizada tanto para fundir como para acelerar o pó contra o substrato. A qualidade desses revestimentos pode ser bastante melhorada com o auxílio de ar comprimido para acelerar as partículas e reduzir a temperatura na periferia da chama ^[6]. Uma maior eficiência nas deposições utilizando pós metálicos, é obtida por meio da utilização de materiais autofluxantes. Estes materiais têm pontos de fusão relativamente baixos e requerem tratamentos térmicos após a aspersão (posterior fusão / difusão para o

substrato) ^[10]. Este tipo de processo consome cerca de 20-30% do total de pó comercializado no mundo, sendo que somente a técnica de aspersão por chama corresponde a 46% do mercado europeu ^[11]. Os equipamentos de aspersão que utilizam arames diferem dos equipamentos a pó pelo fato da combustão do gás ser usada somente para fundir o material. A atomização e aceleração do material fundido para o substrato são realizadas pelo ar comprimido, podendo se utilizar gás inerte a fim de reduzir o nível de óxidos no revestimento formado. As velocidades das partículas situam-se em torno de 150-200 m/s, muito superiores às obtidas nos sistemas a pó sem aceleração por ar comprimido (30 m/s). A energia cinética deste processo é basicamente controlada pela pressão e pela vazão do gás de propulsão ^[10]. A velocidade superior do processo de aspersão a arame, resulta na formação de revestimentos mais densos com menores níveis de porosidade e óxidos, se comparado ao processo de aspersão a pó sem tratamento térmico posterior. As principais variáveis que devem ser reguladas na técnica arame-chama são: pressão e vazão de ar comprimido utilizado para atomizar e acelerar as partículas da fonte de calor até o substrato, velocidade de alimentação do arame e, a vazão e pressão de acetileno e oxigênio para formar e manter a chama para a fusão do material.

II.1.2 - Aspersão por arco elétrico

No processo de aspersão térmica a arco elétrico dois eletrodos consumíveis de arame, que se encontram inicialmente isolados um do outro, avançam continuamente para se encontrar em um ponto onde uma diferença de potencial entre 18 e 40 volts é aplicada por meio dos bicos de contato da pistola para os arames, iniciando um arco elétrico que funde suas pontas. O material fundido é atomizado e propelido por meio de ar comprimido para o exterior da pistola sob a forma de um jato sobre um substrato previamente preparado. Para aplicações

especiais, gases inertes como argônio e hélio podem ser usados ao invés de ar comprimido, com a finalidade de reduzir a oxidação dos materiais dos revestimentos ^[10].

As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Estas reações localizadas formam pequenas zonas "soldadas", levando a um revestimento com boa resistência adesiva e coesiva.

Os aspectos atraentes na técnica a arco elétrico são basicamente a alta eficiência e taxa de deposição, o que se torna bastante econômico para o revestimento de grandes superfícies. Valores da ordem de 13,5 kg/h comparado a 1,8-9 kg/h para a combustão com pó e 5,4 kg/h para a combustão com arame são reportados na literatura ^[10,13].

A ausência de gases de combustão leva a uma redução do aquecimento do substrato, o que é desejável para componentes onde é importante a minimização de deformação ou influência sobre tratamentos já efetuados. As velocidades de partículas podem ser mais altas em relação aos processos de revestimento oxiacetilênicos convencionais (100-330 m/s) ^[10]. O processo de revestimento por Arco elétrico proporciona maior repetibilidade nas características dos revestimentos obtidos devido a maior simplicidade de ajustes. São ajustados apenas corrente elétrica, que é função da velocidade de alimentação do arame, tensão do arco e a pressão de ar.

II.1.3 - Plasma de arco não transferido

No processo de aspersão por plasma, um arco elétrico "não transferido" é gerado entre um eletrodo de tungstênio coaxialmente alinhado em um bocal de

constrição. A zona central do plasma é constituída pelo gás inerte ionizado (em geral argônio, podendo ser também nitrogênio) envolvido por um ou mais gases inertes de proteção (argônio, hélio, hidrogênio, nitrogênio ou mistura) ^[10].

Durante o aquecimento, o gás é parcialmente ionizado, produzindo um plasma. Quando o plasma sai da pistola, moléculas dissociadas de um gás diatômico recombinaem e liberam calor. O pó é introduzido no plasma, fundido e propelido para o substrato através de um fluxo de alta velocidade. A quantidade de calor, temperatura e velocidade do jato plasma são controlados pelo tipo de bocal, corrente de arco, razão de mistura de gases e taxa de fluxo de gás. O arco opera com corrente contínua de uma fonte de energia tipo retificadora.

A temperatura dos gases no plasma formado pode chegar a 17000 °C ^[14]. Utiliza-se em geral como gás de trabalho, Ar ou uma mistura de Ar + H₂, Ar + He e Ar + N₂, algumas vezes N₂ e uma mistura de N₂ + H₂ também são usados. A velocidade na saída da pistola pode alcançar 800 m/s ou mais. As taxas de deposição podem alcançar 25 kg/h para algumas ligas e velocidades de partícula na faixa de 300 m/s para sistemas de 40 kW e 500 m/s para um sistema de 80 kW. ^[15]

II.1.4 - Plasma de arco transferido

O processo de aspersão a plasma de arco transferido, mais conhecido como PTA, adiciona ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. É, praticamente, uma combinação de processos de soldagem e aspersão térmica. Nesta técnica, uma corrente secundária é estabelecida entre o eletrodo da pistola e a peça de trabalho condutora (substrato). A fusão superficial e a profundidade de penetração são controladas pela corrente do arco secundário. O material de adição pode estar na forma de pó, ou arame.

Entre as vantagens resultantes deste aquecimento direto, podem-se citar ligação metalúrgica, alta densidade dos revestimentos, altas taxas de deposição e altas espessuras por passe. Nesta técnica menos energia é necessária, quando comparado ao processo de aspersão de arco não transferido. ^[10]

II.1.5 - O processo de aspersão HVOF

O processo de aspersão HVOF (High Velocity Oxy Fuel), desenvolvido como uma alternativa ao processo de aspersão D-Gun, atualmente vem substituindo em casos específicos de aplicações de “cermets” o processo de aspersão a plasma e tornou-se um dos candidatos mais promissores a substituir o processo de deposição eletrolítica de cromo duro. O processo HVOF pode ser usado em uma larga faixa de aplicações onde ainda utiliza-se o processo eletrolítico de revestimento de cromo, destacando-se entre elas as seguintes:

Os revestimentos de Carboneto de Tungstênio com base cobalto e Carboneto de Tungstênio base cobalto e cromo depositados por aspersão térmica (HVOF) têm se mostrado promissores para substituição do processo de revestimento de cromo eletrolítico em componentes de aeronaves, sendo alvo de pesquisas realizadas pelas forças armadas do Canadá e EUA ^[16, 17].

Estudos mostram que os revestimentos WC-12%Co depositado por HVOF em aço AISI 4340 apresentam melhores desempenhos quanto à fadiga e ao desgaste abrasivo se comparados ao Cromo duro eletrolítico ^[18].

Os revestimentos por HVOF de Carbonetos de Cromo e Molibdênio em anéis de motores diesel apresentam desempenhos até três vezes superiores ao cromo duro eletrolíticos ^[19]. O processo produz revestimentos de excelente qualidade com respeito à porosidade, dureza, aderência, densidade e rugosidade ^[20, 21], combinados com baixas tensões residuais ^[22,23].

A indústria automotiva está ativamente engajada no desenvolvimento de aplicações práticas de revestimentos aplicados por aspersão térmica em peças como cilindros, pistões, anéis de pistões e válvulas ^[3]. As condições de desgaste, corrosão e erosão a altas temperaturas a que são submetidos tais componentes requerem materiais mais adequados a tal regime de funcionamento, o que pode ser atendido por revestimentos específicos. A alta resistência à erosão-corrosão em alta temperatura da liga $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ depositada por HVOF em relação a outros cermets e cerâmicas tem sido estudada e relacionada à sua microestrutura, caracterizada por uma densa rede de finos carbonetos de cromo (Cr_3C_2) e óxidos de cromo (Cr_2O_3) homogeneamente distribuídos em uma matriz metálica, dúctil e resistente à corrosão constituída de NiCr ^[20].

O processo HVOF é particularmente adequado para aplicação de revestimentos de carbonetos (cermets) devido à sua baixa temperatura de chama e baixo tempo de permanência do material na chama, em comparação com processos à arco elétrico e à plasma ^[20]. Os revestimentos apresentam maiores durezas e baixas quantidade de poros e óxidos, combinadas com baixas tensões residuais nos revestimentos ^[22,23].

Durante os últimos 20 anos, muitas composições novas de carbonetos têm sido utilizadas com sucesso pelo processo de revestimento por aspersão térmica HVOF. Materiais como o WC-10Ni e o WC-10Co-4Cr foram desenvolvidos para fornecer uma excelente combinação de resistência ao desgaste e resistência à corrosão. Estes materiais agora estão sendo especificados para aplicações críticas, como em componentes de trens de pouso de aeronaves ^[24].

O processo HVOF é baseado em um sistema de combustão interna de alta pressão, similar a uma miniatura de um propulsor de foguete. Combustível e oxigênio são misturados para produzir um jato de gás supersônico que alcança 2000 m/s a 2800°C. A figura 02 ilustra o equipamento de aspersão HVOF durante

operação. Os combustíveis usados incluem querosene, hidrogênio, propileno, propano, acetileno, metil-acetileno propadieno e gás natural. Os materiais a serem depositados, em forma de pó, são introduzidos no interior da chama, dentro do tubo de saída dos gases e podem produzir revestimentos sobre uma variedade ilimitada de substratos^[24]. Ao atingirem o substrato, as partículas fundidas/semi-fundidas deformam-se, espalham-se lateralmente e solidificam-se rapidamente para formarem as microestruturas típicas dos revestimentos obtidos por aspersão térmica via HVOF. Este tipo de revestimento consiste, portanto de muitas partículas lenticulares sobrepostas e conectadas. Isto resulta nas características tribológicas de tais revestimentos diferindo significativamente daquelas do substrato.^[22]

A ignição da combustão, o controle do gás, e da potência são muito simples neste sistema. As taxas de fluxo dos dois fluidos principais são controladas por fluxômetros. Solenóides operadas eletricamente ativam o jato principal de combustão. O fluxo do pó é também controlado eletricamente e as taxas de alimentação controladas automaticamente. São depositados por este processo pós de: metais puros, ligas metálicas, carbonetos e algumas cerâmicas e plásticos^[22].

As altas velocidades de partículas proporcionadas pelas pistolas HVOF têm provocado discussões sobre a real necessidade de que as partículas estejam mesmo no estado líquido para obterem-se revestimentos de alta qualidade. Admite-se que o impingimento da partícula contra o substrato, ou contra as partículas já depositadas, possa levar a uma fusão superficial pela alta deformação imposta às mesmas. A plastificação das partículas sem superaquecimento, ao invés de sua fusão, tem sido considerada relevante de modo a minimizar as tensões residuais^[12]. Processos mais recentes como o “Cold Spray” já utilizam somente a energia cinética para a formação dos revestimentos, porém sua aplicação é restrita a ligas de baixos pontos de fusão.

Figura 02 – Processo de aspersão térmica HVOF em operação.

II.2 - Processo de cromo duro eletrolítico

Funcionalmente, o processo de revestimento com cromo duro está associado com as operações de fabricação e manutenção em aeronaves, veículos e navios, civis ou militares, além de diversas outras aplicações na indústria, como hastes de atuadores hidráulicos, mancais, colos de retentores, cilindros gráficos, entre outros. Este revestimento fornece um tratamento de superfície efetivo para redução do desgaste e em alguns casos, corrosão. O cromo duro tem sido usado por mais de 70 anos, e tem fornecido, por ser relativamente barato, uma solução efetiva. Ambientalmente, o problema de tal revestimento não é o cromo em si, mas sim o processo de revestimento que utiliza uma solução de ácido crômico o qual é liberado para o ar durante o processo na forma de uma fina névoa. Esta névoa contém íons de cromo no estado hexavalente, o qual é cancerígeno além de causar vários outros problemas de saúde como perfuração das vias respiratórias e erupções na pele. Como resultado, o EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) promulgou novas e mais restritivas leis para limitar a liberação de cromo hexavalente no meio ambiente. Adicionalmente o Departamento de Administração

de Segurança e Saúde dos EUA (OSHA) estabeleceu limites de exposição para o cromo hexavalente no ambiente de trabalho a níveis de $0,1\text{mg}/\text{m}^3$. Estudos recentes indicam que o risco de câncer ainda é significativamente alto para este nível, podendo-se, portanto antecipar que a OSHA irá definir um nível substancialmente menor em relação ao valor atual. Isto deverá aumentar o custo da operação de revestimentos por cromo duro tornando proibitivo seu uso em certas aplicações.^[25] Decorre daí uma das principais motivações para o desenvolvimento de revestimentos substitutos ao cromo.

O desgaste é a causa principal do uso de revestimentos, sendo apresentado em seguida, uma revisão do assunto.

II.3 - O processo de desgaste

O desgaste pode ser definido como a deterioração de uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo desta superfície em contato com outra ou com outra substância ou substâncias ^[26], podendo ser também resultado de um acúmulo de tensão nas regiões próximas à superfície, levando a formação e propagação de trincas e, em casos extremos, à fratura do material ^[27].

II.3.1 - Tipos de desgaste

Muitos pesquisadores classificam o desgaste de acordo com a aparência da superfície desgastada e na base do mecanismo fundamental que está operando. Este último enfoque é complicado, pelo fato que mais do que um mecanismo pode estar operando ao mesmo tempo.

São indicados a seguir os quatro mecanismos básicos de desgaste, esquematizados na figura 18, e que são amplamente aceitos: [27, 28]

- adesão;
- abrasão;
- reação triboquímica;
- fadiga de superfície.

Os quatro mecanismos básicos de desgaste estão esquematizados na figura 03.

Figura 03 - Descrição esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste.

O desgaste por adesão ou fricção ocorre quando superfícies deslizam uma contra outra e a pressão entre as asperezas em contato é bastante alta para causar deformação plástica local e adesão. A alta força de contato resultante causa adesão local entre as asperezas, que tornam-se altamente tensionadas se as superfícies são forçadas a deslizar. A continuidade do movimento resulta na fratura desses picos nos pontos mais fracos permitindo a continuação do deslizamento. A quantidade de desgaste adesivo que ocorre durante este deslocamento, depende

de vários fatores, incluindo a carga aplicada, velocidade, temperatura, área real de contato e limpeza da superfície em atrito ^[29].

O desgaste por abrasão, que representa mais de 50% dos problemas de desgaste industrial, é um fenômeno causado pelo deslocamento ou amassamento de material de uma superfície sólida ou duas superfícies em movimento relativo, devido a partículas duras ou protuberâncias deslizando ao longo da superfície ^[30]. A ação abrasiva pode ser direta, quando a remoção de partículas da superfície metálica é por cisalhamento, ou indireta, por fadiga superficial. Nestes casos, é indiferente se o abrasivo se desloca em relação à peça ou a peça, (superfície metálica que esta sendo desgastada) desloca-se em relação à partícula abrasiva. As partículas são, na grande maioria dos casos, de origem mineral. A taxa de desgaste depende ainda do grau de penetração da partícula abrasiva na superfície metálica, e está relacionada com a dureza superficial do material ^[29].

O **desgaste por fadiga superficial** pode ser caracterizado pela formação de trincas e esfoliação de material, causados por carregamentos alternados repetidos. Fadiga localizada pode ocorrer em uma escala microscópica, devido a choques repetidos por deslizamento de asperezas na superfícies de sólidos em movimento relativo. Em conexão com o mecanismo de adesão ou abrasão, repetidos escorregamentos de asperezas duras através da superfície sólida podem causar a formação ou a propagação de trincas em/ou abaixo da superfície solicitada ^[27]. Este tipo de desgaste é particularmente importante em mancais de rolamento e é conhecido como “fadiga de contato por rolamento”.

O **desgaste por reação triboquímica** é a formação de produtos de reação química, como um resultado das interações químicas entre os elementos de um tribosistema iniciado por ação tribológica ^[27]. Quando o atrito entre duas superfícies

ocorre em presença de substâncias líquidas ou mesmo gasosas, podem ocorrer reações químicas, e os produtos formados desprendem-se. A nova superfície formada é exposta novamente às substâncias e o processo se repete. O grau de desgaste corrosivo é dependente do potencial elétrico entre os materiais envolvidos e das condições ambientes (ph do meio, temperatura, concentração de elementos)

II.3.2 - Classificação de desgaste por abrasão

Na prática industrial adotou-se uma classificação para o desgaste abrasivo, de acordo com a severidade das tensões envolvidas ^[29].

- abrasão por goivagem ou sulcamento: envolve a remoção da superfície pela ação de materiais abrasivos geralmente com dimensões grosseiras, sob condições de altas tensões e envolvendo impacto.
- abrasão por riscamento ou baixas tensões: resulta do deslizamento de partículas livres sobre a superfície do componente. Na abrasão por riscamento ou baixas tensões a superfície desgastada é riscada pelo material abrasivo que, ao penetrar na superfície, promove a remoção de material. Neste caso, as tensões impostas sobre as partículas abrasivas são inferiores à tensão necessária para a fragmentação extensiva do abrasivo
- abrasão por moagem ou altas tensões: ocorre em equipamentos onde o material abrasivo é forçado a passar entre duas superfícies tensionadas. A superfície desgastada pode exibir uma variação de grau de riscamento com deformação plástica das fases suficientemente dúcteis ou fratura das fases frágeis presentes no material. Detritos podem ser formados depois de repetidos escoamentos plásticos por um mecanismo de fadiga ou por lascamento ^[31].

Outro sistema de classificação relaciona-se com o tipo de contato, assim como o contato com o meio ambiente. A figura 20 mostra o esquema simplificado desta distinção^[32].

- Abrasão a dois corpos: (figura 04a) ocorre quando uma superfície áspera ou partículas abrasivas fixas deslizam sobre a superfície sendo desgastada. As superfícies mantêm uma orientação constante entre si durante o período de contato.
- Abrasão a três corpos: (figura 04b) ocorre quando existem abrasivos livres, interpostos entre duas superfícies em movimento e as partículas soltas podem ter movimento relativo entre si, além de sofrerem rotação durante o deslizamento sobre a superfície desgastada.

Figura 04 - Distinção esquemática entre abrasão a dois corpos e a três corpos

II.3.3 - Fatores que afetam o desgaste abrasivo

Os fatores que afetam a perda por desgaste abrasivo incluem: o tipo de abrasivo e suas características, velocidade de deslizamento, temperatura, carga, lubrificação, umidade e efeitos corrosivos. São detalhados em seguida^[33].

Abrasivo.- as características do abrasivo, tais como dureza, tenacidade, tamanho e geometria do abrasivo contribuirão para o desgaste.

Dureza do abrasivo - a taxa de desgaste depende do grau de penetração da superfície pelo abrasivo e está portanto relacionada à dureza superficial do material ^[34]. Quando a dureza abrasiva excede a dureza do material, ela é capaz de penetrar a superfície e cortar ou remover o material. A relação entre dureza do abrasivo e dureza do material (H_a/H_m) indica três comportamentos distintos com relação à velocidade de desgaste (figura 05). Para H_a/H_m entre 0,7 a 1,1 a taxa de desgaste é pequena; para H_a/H_m entre 1,3 a 1,7 a taxa de desgaste é elevada. Na faixa intermediária há uma região de transição, com o desgaste aumentando com a relação H_a/H_m ^[35, 36].

Figura 05 - Velocidade de desgaste relativo em função da razão entre dureza do abrasivo e dureza do metal ^[35].

Geometria das partículas abrasivas - o formato da partícula abrasiva influencia nos sulcos produzidos no material. Ele também influencia no contato da carga e a transição do contato elástico para plástico. Quanto mais agudas forem as arestas das partículas abrasivas maior será sua ação abrasiva, e quando aliado ao impacto ou fortes pressões, estas partículas podem penetrar na superfície mais

profundamente e, dependendo do ângulo de ataque (β) pode provocar a formação de cavacos, conforme mostra a figura 26 (β_c = ângulo de ataque crítico) ^[33].

Figura 06 - Influência da geometria da partícula abrasiva no desgaste abrasivo.

Tamanho do abrasivo - o volume de material removido no desgaste de vários materiais metálicos, aumenta linearmente com o tamanho da partícula abrasiva, sendo que esta variação é bastante acentuada até um tamanho crítico de partícula e a partir dele, a variação é menos sensível, conforme mostrado na figura 07 ^[37]. A tenacidade das partículas abrasivas é um importante fator durante a abrasão. A perda do material pode aumentar quando a tenacidade do abrasivo aumenta ^[33]. Isto se deve a maior dificuldade na fragmentação do abrasivo durante o processo de desgaste e consequente manutenção da sua dimensão original, porém a fragmentação do abrasivo provoca o surgimento de novas arestas de corte e possível aumento na taxa de desgaste.

Figura 07 - Velocidade de desgaste em função do tamanho do abrasivo.

Velocidade de Deslizamento - o volume de material removido por abrasão aumenta ligeiramente com a velocidade de deslizamento até 2,5m/seg. Este aumento de desgaste pode ser atribuído ao aquecimento da superfície provocada pelo atrito das partículas abrasivas, o que provoca uma diminuição das propriedades mecânicas do material ^[33].

Temperatura - a influência de temperaturas elevadas em peças metálicas sujeitas à abrasão por partículas metálicas ou não metálicas, manifesta-se mesmo sob fraca pressão. Com o aumento da temperatura, aumenta a taxa de desgaste, devido à diminuição da dureza e do limite convencional de elasticidade.

Carga - aumentando a carga aumenta-se a taxa de desgaste. Há também um ponto crítico de carga em que ocorre o emperramento.

Dureza do material – a dureza do material constitui uma das principais propriedades associadas ao desempenho contra o desgaste. As maiores durezas

correspondem a resistências maiores e os abrasivos menos duros terão ação menos intensa.

Umidade - a umidade tem forte influência nas taxas do desgaste abrasivo. Usualmente as taxas de desgaste aumentam com o teor de umidade na atmosfera mas há ocasiões em que o efeito é o contrário. A previsão do efeito da umidade para qualquer caso particular é difícil. Estudos realizados ^[28] mostraram que, quando a umidade é controlada, dados de desgaste abrasivo devem ser reproduzíveis (dentro $\pm 2\%$). Quando a umidade não é controlada, a variação na taxa de desgaste de 10% para 20% torna-se possível.

II.3.4 - Ensaio de desgaste abrasivo

Diversos autores indicam a impossibilidade de se encontrar um ensaio universal para o desgaste abrasivo, dada a grande complexidade do fenômeno e as variações de comportamento em diferentes situações. Ressalta-se ainda que o desgaste não é uma propriedade intrínseca do material desgastado, mas depende da combinação de todos os materiais presentes e dos fatores envolvidos no processo de desgaste como um todo ^[38]. O ensaio de desgaste é a ferramenta que é utilizada para avaliar o custo e conseqüências de desgaste.

II.3.4.1 - Ensaio de desgaste micro abrasivo

O ensaio de micro abrasão constitui-se num ensaio recente e com uso crescente, sendo adequado para o exame tanto de camadas finas resistentes ao desgaste quanto de materiais monolíticos com abrasivos finos ^[39]. Deve-se tomar o cuidado necessário na interpretação dos dados experimentais, visto que mudanças nas condições do ensaio, ou até mesmo no material ensaiado, podem alterar

radicalmente o comportamento das partículas abrasivas no ensaio ^[40]. Com a utilização de cargas pequenas, são observados rolamentos das partículas pela zona de contato em alguns casos e deslizamento em outros; tais mudanças no movimento da partícula permitem que comparações das taxas de desgaste sejam estimadas com dificuldade devido aos diferentes mecanismos envolvidos no processo.

Nos ensaios de desgaste calotest ou micro abrasivo, uma esfera é girada contra uma amostra na presença de uma lama com partículas abrasivas finas, formando uma calota de desgaste com geometria bem definida, que pode ser medida de um modo simples para se obter o volume desgastado. O método pode ser aplicado em componentes de engenharia bem como em materiais no estado bruto, sendo um procedimento de ensaio relativamente simples ^[39].

Um requisito fundamental de um ensaio de desgaste padrão é que ele forneça medidas confiáveis e reproduzíveis. Porém, taxas e mecanismos de desgaste podem variar amplamente com mudanças nas condições do ensaio, tais como carga e velocidade de deslizamento ^[41]. Os mecanismos de desgaste no ensaio microabrasivo podem variar de abrasão a três-corpo (com movimento de partícula rolante) para abrasão a dois-corpos (com movimento de partícula entalhada) quando ocorre variação da carga, da fração volumétrica do abrasivo na lama, da viscosidade da lama abrasiva, dos materiais da amostra e da esfera, e das condições superficiais da esfera ^[42, 43, 44]. Em trabalhos prévios, uma condição crítica foi proposta para a transição de abrasão a três-corpos para dois-corpos a qual pode ser usada para estabelecer o mecanismo de desgaste em um ensaio prático ^[45].

O ensaio de desgaste micro-abrasivo foi proposto por Rutherford e Hutchings nos anos 90. Este ensaio oferece algumas vantagens quando comparado aos outros ensaios tribológicos: ele requer uma pequena área de ensaio e os coeficientes de desgaste intrínseco de ambos material e camadas podem ser

avaliados simultaneamente a partir de seus dados combinados. A figura 08 mostra um diagrama esquemático do mecanismo do ensaio de desgaste microabrasivo do tipo calotest.

Figura 08 - Diagrama esquemático mostrando (a) equipamento e (b) detalhes da interface de contato entre corpo de prova e alimentação do abrasivo.

Neste método, uma esfera de raio "R" é girada contra uma amostra na presença ou não de uma lama com finas partículas abrasivas. A geometria da cratera do desgaste reproduz a geometria esférica, e o volume do desgaste pode então ser calculado pelas medidas do diâmetro da calota ou sua profundidade. O volume do desgaste está diretamente relacionado com a distância percorrida e com a força normal de acordo com a seguinte relação:

$$V = \kappa SN$$

onde;

k - é o coeficiente de desgaste ou taxa de desgaste específico ($N^{-1}m^2$);

S - é a distância percorrida para o desgaste;

N - é a força normal na superfície de contato.

Para uma calota de desgaste de geometria esférica produzida por um contracorpo esférico com raio “R” numa amostra inicialmente plana, o volume de desgaste pode ser calculado de acordo com a seguinte relação;

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \text{ para } b \ll R$$

Onde:

R – é o raio da esfera;

b - é o diâmetro da calota

Existe um grande número de parâmetros que afetam os resultados dos ensaios por micro abrasão, a seguir descritos:

- material abrasivo;
- tamanho do abrasivo;
- forma do abrasivo;
- fluido da suspensão abrasiva;
- carga utilizada;
- velocidade relativa das superfícies;
- material da esfera;
- condição superficial da esfera e do corpo de prova;

Considerando-se a força de fricção que age entre as superfícies de ensaio e as partículas abrasivas, haverá um limite superior para o diâmetro das partículas de abrasivo para que estas sejam puxadas para a interface entre amostra e esfera. Considerando-se uma esfera de 25 mm de diâmetro o diâmetro crítico da partícula abrasiva está em torno de 10 micrometros ^[43]. Se nenhum abrasivo estiver na interface o mecanismo de desgaste muda radicalmente.

Conforme observado por Trezona e Hutchings ^[44] o uso de altas cargas normais a superfície da amostra dificulta a penetração de partículas na interface esfera-amostra, devido ao aumento na pressão de contato.

A figura 09 apresenta um modelo esquemático da zona de contato entre esfera e amostra.

Figura 09 - Modelo esquemático mostrando (a) a área de interação e (b) uma visão detalhada.

II.3.4.2 - O ensaio abrasivo a baixa tensão

Este método descreve uma das práticas mais amplamente usadas para se medir a resistência à abrasão de sólidos e, mais recentemente, de camadas. Seu procedimento é estabelecido pela norma ASTM G65-94 ^[46]. Um esquema do ensaio é mostrado na figura 10. A amostra a testar é um bloco retangular que é pesado e carregado oposto ao disco giratório, que é recoberto com borracha; um tipo específico de areia flui entre a amostra e o rotatório para um tempo definido, e o volume de material gasto da superfície do bloco é determinado indiretamente por pesagem, a partir de sua densidade ^[47].

Figura 10 - Representação gráfica do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo a baixa tensão ^[46].

II.3.4.3 - Ensaio de desgaste abrasivo para carbonetos sinterizados

Este ensaio tem o seu procedimento estabelecido pela norma ASTM B 611 para ensaios de revestimentos de carbonetos. O equipamento utiliza um eixo acionado acoplado a um disco em aço carbono, semelhante ao sistema utilizado para ensaio de desgaste abrasivo de baixa tensão imerso em uma mistura aquosa com óxido de alumínio branco angular. A amostra a ser ensaiada, em forma de bloco retangular, é pressionada contra o disco que está girando, por meio de uma carga aplicada por um braço de alavanca. Os corpos de provas são pesados antes e após do ensaio e a perda de massa é determinada. Um esquema do ensaio é mostrado na figura 11. Para possibilitar a comparação entre vários revestimentos, torna-se necessário converter a perda de massa para perda de volume em milímetros cúbicos, devido a diferença nas densidades dos materiais, ^[48]. A seguinte equação é usada para a determinação da perda de volume por desgaste da amostra.

$$\text{PERDA DE VOLUME (mm}^3\text{)} = 1000 \times \text{Perda de Massa (g)} / \text{Densidade (g/cm}^3\text{)}$$

Figura 11 - Representação gráfica do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo de carbonetos ^[48].

Estes ensaios foram utilizados para comparação de desempenho, quanto à resistência ao desgaste abrasivo, dos revestimentos obtidos.

A fim de se avaliar a efetividade dos revestimentos de “cermets” produzidos por HVOF para substituição do cromo duro eletrolítico, foram selecionadas duas ligas depositadas por HVOF, o $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e o WC-CoCr . Estudos recentes ^[17,18, 25] propõem o uso do WC-CoCr e do WC-Co em substituição ao cromo duro eletrolítico, porém com desvantagens para este último quanto a resistência à corrosão, se comparado ao cromo duro, o que nos levou a optar no presente trabalho pela utilização da liga WC-CoCr . A resistência à corrosão intrínseca das ligas de NiCr , associada a elevada dureza dos carbonetos de cromo^[2] e o menor custo atual da liga $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ^[49], se comparado aos materiais aspergidos contendo elevado teor de WC , foram fatores preponderantes na escolha deste segundo tipo de material selecionado para o presente trabalho.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

As composições químicas nominais dos pós para os revestimentos usados neste trabalho são apresentadas na tabela 01. Os materiais WC-CoCr e $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ foram depositados pelo processo HVOF e o cromo duro, utilizado para comparação foi depositado pelo processo eletrolítico.

A figura 12 apresenta o fluxograma do procedimento experimental realizado no presente trabalho.

Tabela 01 – Composições químicas nominais dos materiais estudados.

	Porcentagem em peso dos compostos/elementos				
	WC	NiCr	Co	Cr	C_2Cr_3
WC-CoCr	bal	-	9	4	
$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	-	25	-		bal

Figura 12 – Fluxograma do procedimento experimental.

III.1 - Revestimentos dos corpos de prova

Os revestimentos, produzidos pelo processo HVOF, foram realizados na OGRAMAC Metalização¹.

¹ Ogramac Indústria e Comércio Ltda. - Sto. Antonio de Posse-SP

Corpos de prova em aço AISI 1045, na condição como recebido, com as dimensões de 25 mm x 150 mm x 12 mm foram preparados previamente por jateamento abrasivo grau Sa 3 (conforme norma SIS 055900 ^[57]) na superfície a ser aspergida, conforme procedimento interno da empresa, a fim de se promover a limpeza da superfície e a rugosidade necessária à aderência. Realizou-se o revestimento em uma das faces de cada corpo de prova respectivamente com os materiais Cr_3C_2 -NiCr e WC-CoCr pelo processo HVOF utilizando-se um equipamento Tafa JP-5000. As ligas utilizadas nos revestimentos são fornecidas em forma de pó. Os parâmetros utilizados para a aspersão do pó são apresentados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 02 – Parâmetros de aplicação do material WC-CoCr

Descrição	Unidades	Descrição	Unidades
Tamanho do canhão	101,6 mm	Pressão do oxigênio	1448 kPa
Distância de aspersão	380,0 mm	Vazão do oxigênio	65,4 l/h
Taxa de alimentação	98 g/min	Pressão do querosene	1172 kPa
Pressão do nitrogênio	345 kPa	Vazão do querosene	21,6 l/h
Vazão de nitrogênio	0,81 l/h		

Tabela 03 – Parâmetros de aplicação do material Cr_3C_2 -NiCr

Descrição	Unidades	Descrição	Unidades
Tamanho do canhão	101,6 mm	Pressão do oxigênio	1448 kPa
Distância de aspersão	380,0 mm	Vazão do oxigênio	65,4 l/h
Taxa de alimentação	58 g/min	Pressão do querosene	1172 kPa
Pressão do nitrogênio	345 kPa	Vazão do querosene	21,6 l/h
Vazão de nitrogênio	0,74 l/h		

Os corpos de prova de aço AISI 1045 para revestimento com cromo duro, com as dimensões 25 mm x 150 mm x 12 mm, receberam preparação por limpeza química com desengraxante e posterior decapagem. A seguir realizou-se a deposição do cromo duro por processo eletrolítico em empresa especializada.

III.2 - Preparação dos corpos de prova revestidos por HVOF para análises metalográficas

O procedimento constou das seguintes etapas:

Corte na seção transversal, em um *cut-off* ; Embutimento em baquelite; Lixamento com lixa diamantada ; Polimento com pasta diamantada, na seqüência de granulometria $6\text{ }\mu\text{m} > 3\text{ }\mu\text{m} > 1\text{ }\mu\text{m}$

III.3 - Preparação do corpo de prova com cromo duro para análise metalográfica

O procedimento constou das seguintes etapas:

Corte na seção transversal, em um *cut-off* ; Embutimento em baquelite; Lixamento com lixa na seqüência $220 > 400 > 600 > 1200$ mesh; Polimento com alumina $0,3\text{ }\mu\text{m}$ e $0,05\text{ }\mu\text{m}$

III.4 - Análise Micrográfica e de Porosidade

A aquisição de imagens foi realizada com uma câmera de vídeo acoplada a um microscópio ótico *Carl Zeiss - Axiotech*. As imagens foram enviadas para um computador *Macintosh Power PC 8500*. A figura 13 ilustra os equipamentos utilizados para aquisição de imagem. A quantificação de porosidade foi realizada por meio de software *Ultimage Pro*. Para cada revestimento analisado, quanto à porosidade, foram adquiridas dez amostragens de área transversalmente à camada.

Figura 13 - Computador Macintosh Power PC 8500 , Microscópio Axiotech da Carl Zeiss.

III.5 - Ensaios de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados em um microdurômetro digital conforme norma ASTM E 384 ^[58], com carga de 300 gf. O indentador utilizado apresenta ponta de diamante padrão Vickers. O equipamento fornece os valores de dureza em Vickers.

III.6 - Determinação da densidade real dos revestimentos depositados

Parte dos revestimentos previamente depositados foi removida dos corpos de prova por meios mecânicos, sendo os materiais submetidos a análise por picnometria de hélio em um equipamento Ultrapycnometer 1000 da Quantachrome. Para cada amostra foram realizadas dez medições. Os dados foram utilizados para os cálculos referentes a perda de volume nos ensaios de desgaste.

III.7 - Difração de Raios-X

Realizou-se análises das superfícies das amostras revestidas e retificadas, e dos pós depositados por aspersão térmica, por difratometria de raios-x a fim de se determinar as fases e compostos presentes nas mesmas e o nível de degradação dos materiais após aplicação. Foi utilizado um difratômetro Simiens D5000, com tubo de radiação de Cu. As amostras foram analisadas por meio da técnica de varredura contínua, uma velocidade de varredura de 1 grau por minuto e 2 theta variando de 20 a 120 graus

III.8 - Ensaio de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha conforme a norma ASTM G 65-94

A partir das amostras revestidas originais foram cortados corpos de prova em um cut-off nas dimensões de 25mm x 70mm x 12mm para suas avaliações sob desgaste abrasivo conforme norma ASTM G65-94 procedimento A. As superfícies das amostras a serem ensaiadas foram retificadas de forma que o grau de acabamento superficial fosse equivalente (0,3 a 0,6 micrometros Ra). É apresentado na figura 14 o equipamento utilizado no ensaio. O corpo de prova é pressionado contra o disco metálico revestido com borracha de dureza entre 58 a 62 Shore A com uma força normal de 130 N. Entre as superfícies da amostra e do disco é vertido areia (SiO_2) com granulometria entre 0,212 mm e 0,300 mm (figura 15) a um fluxo de 300 a 400 g/min. A velocidade de rotação do disco foi de 200 rpm com um tempo de ensaio de 30 minutos, perfazendo 6000 revoluções ou 4309 m em distância linear percorrida para o desgaste sobre a amostra. Por meio da medição das perdas de massa geradas nos corpos de prova e da densidade

previamente mensurada, determinou-se a perda de volume de material durante o ensaio para cada revestimento avaliado.

Figura 14 – Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha.

Figura 15 - Fotomicrografia do abrasivo quartzo utilizado no ensaio de desgaste, obtida por microscopia eletrônica de varredura.

III.9 - Ensaio de desgaste abrasivo para carbonetos sinterizados, conforme a norma ASTM B 611-96 modificada

A partir das amostras revestidas originais foram cortados corpos de prova em um cut-off nas dimensões de 25mm x 70mm x 12mm para suas avaliações sob desgaste abrasivo conforme norma ASTM B 611 com procedimentos modificados em relação à carga e número de revoluções do disco, devido ao fato dos revestimentos ensaiados não suportarem, sem que fosse atingido o material base nas condições de ensaio especificadas. As superfícies das amostras a serem ensaiadas sofreram retífica de forma que o grau de acabamento superficial fosse equivalente (0,3 a 0,6 micrometros Ra). É apresentado na figura 16 o equipamento utilizado no ensaio. Um disco de aço AISI 1020, acionado pelo eixo motriz, desliza contra a amostra com uma força normal de 94,8 N. O disco fica parcialmente imerso em uma lama abrasiva na razão de 1cm³ de água para cada 4g de óxido de alumínio angular de granulometria 30 mesh (figura 17). Aletas laterais no disco garantem que a lama seja constantemente revolvida, mantendo-se durante o ensaio, sobre a superfície do disco, uma camada de lama abrasiva. A velocidade de rotação do disco utilizada foi de 100 rpm, perfazendo um total de 200 revoluções ou 106,2 m em distância linear percorrida para o desgaste sobre a amostra. Por meio da medição das perdas de massa geradas nos corpos de prova e da densidade previamente mensurada determinou-se a perda de volume de material durante o ensaio para cada revestimento avaliado.

Adicionalmente foi realizado, para o revestimento de WC-CoCr, um novo ensaio seguindo-se um segundo procedimento a fim de se verificar a influência dos parâmetros sobre o material ensaiado em condições mais próximas das normalizadas. A carga normal sobre a amostra foi, conforme especificado pela

norma, 20 kgf (196,2N). A velocidade de rotação do disco utilizada foi de 100 rpm, perfazendo um total de 500 revoluções.

Figura 16 – Equipamento utilizado para o ensaio de desgaste abrasivo, conforme ASTM B 611

Figura 17 - Fotomicrografia do abrasivo alumina utilizado no ensaio de desgaste abrasivo, obtida por microscopia eletrônica de varredura.

III.10 - Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo (“Calotest”)

A partir das amostras originais foram cortados corpos de prova em um cut-off nas dimensões de 25mm x 25mm x 12mm para avaliação sob desgaste microabrasivo. As superfícies a serem ensaiadas foram retificadas. Foi em seguida realizado o ensaio tipo “calotest”, sendo apresentado na figura 18 o equipamento utilizado no ensaio. Uma esfera de aço AISI 52100 temperado e revenido com diâmetro de 25,4 mm, acionada pelo eixo motriz, desliza contra a amostra com uma força normal de 85,8 N, mensurada por meio de célula de carga em condição estática. Entre as superfícies da amostra e da esfera foi adicionado por gotejamento solução de diamante de 1 µm, angular e monocristalino marca Buehler Metadi (figura 19), em suspensão de base aquosa com uma frequência de uma gota a cada 15 segundos. A velocidade de rotação na esfera foi de 148 rpm. Utilizaram-se distâncias percorridas pela superfície da esfera de 59m, 118m, 177m e 236m para cada material estudado. Por meio da medição dos diâmetros das calotas esféricas geradas nos corpos de prova determinou-se a perda de volume de material durante o ensaio para posterior comparação do desempenho dos revestimentos conforme a equação a seguir:

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R$$

Onde:

R – é o raio da esfera;

b - é o diâmetro da calota mensurada na superfície da amostra

Figura 18 – Equipamento utilizado no ensaio tipo “calotest”.

Figura 19 - Fotomicrografia do abrasivo utilizado no ensaio de desgaste micro abrasivo (Buehler Ltd)

III.11 - Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

Foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura dos pós depositados por aspersão térmica e dos abrasivos alumina e areia a fim de se verificar a morfologia das partículas. As superfícies dos revestimentos resultantes dos ensaios de abrasão foram analisadas a fim de se observar os mecanismos de desgaste atuantes em cada ensaio.

IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1 - Análise Metalográfica e de Porosidade

São apresentadas nas figuras 20 a 22 as fotomicrografias das secções transversais correspondentes às três camadas produzidas. Tanto o material $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ quanto o material WC-CoCr geraram revestimentos com uma distribuição homogênea de carbonetos nas respectivas matrizes metálicas, conforme figuras 20 e 21. A espessura média da camada foi de 0,7 mm para o $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e para o WC-CoCr após retífica. Os carbonetos de tungstênio existentes no revestimento proveniente do material WC-CoCr apresentam-se mais finos se comparados aos carbonetos de cromo do revestimento do material $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. O revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresentou a maior quantidade de óxidos dentre os revestimentos analisados. Os óxidos presentes na camada depositada por HVOF se formam durante o processo de aspersão, devido as reações ocorridas entre as partícula semi-fundidas e a atmosfera, durante o tempo de permanência das partículas entre o canhão de saída da pistola e a superfície revestida. O revestimento de cromo duro apresentou uma zona de poros aproximadamente a 0,2 mm do substrato, o que pode ser devido a uma interrupção no processo de deposição, sendo também verificada a presença de trinca inerente ao processo (figura 20). A espessura média de camada, após retífica, para o cromo duro foi de 0,6 mm.

A tabela 04 apresenta os valores de porosidades obtidos pelas análises dos revestimentos.

Figura 20 - Fotomicrografia da secção transversal do revestimento de WC-CoCr

Figura 21 - Fotomicrografia da secção transversal do revestimento de Cr₃C₂-NiCr.

Figura 22 - Foto micrografia da secção transversal do revestimento de cromo duro

Tabela 04 - Valores de porosidades obtidos pela análise dos revestimentos.

	Cr₃C₂-NiCr	WC-CoCr	Cromo duro
Valor Médio (%) da Porosidade	3,51	1,21	0,59
Desvio Padrão (%)	0,21	0,29	0,0011

IV.2 - Ensaio de microdureza

Os resultados dos ensaios de microdurezas nas camadas depositadas são apresentados na tabela 05.

Tabela 05 - Valores de microdurezas obtidos nos revestimentos estudados.

Material	WC-CoCr	Cr ₃ C ₂ -NiCr	Cromo duro
Dureza (HV) Carga 0,3 kgf	1337	927	946
	1419	982	946
	1397	883	901
	1279	1020	970
	1280	1056	970
	1274	1065	927
	1226	942	970
	1197	887	995
	1279	804	970
	1324	893	978
Média	1301,2	945,9	957,3
Desvio Padrão	69,6	84,2	27,6

Pela análise dos valores obtidos pelos ensaios de microdureza verifica-se que o revestimento de WC-CoCr apresentou a maior dureza média dentre os materiais analisados (1302,2 HV), sendo que o cromo duro apresentou uma dureza intermediária (957,3 HV) e o revestimento de Cr₃C₂-NiCr apresentou dureza média semelhante (945,9 HV). Isto se deve a alta dureza do WC se comparada aos outros materiais, 2200HV para o WC, contra 1400HV Cr₃C₂ [50] e 946 HV Cromo duro. Os materiais aspergidos apresentam-se como compósitos metal-cerâmica, sendo as microdurezas encontradas, valores médios dos compostos de cada microestrutura depositada por HVOF. Estes revestimentos apresentam variação de dureza intrínseca à sua morfologia.

Verifica-se que o maior desvio padrão foi encontrado para o revestimento de Cr₃C₂-NiCr (84,2HV), o que está relacionado a sua menor homogeneidade devido à presença de carbonetos maiores em relação ao WC-CoCr, maior nível de porosidade dentre os revestimentos analisados e óxidos na microestrutura, conforme evidenciado pela análise metalográfica e difração de raios-x deste revestimento. O maior nível de porosidade no revestimento tende a diminuir o valor

de dureza encontrado devido a maior deformação plástica permitida pelos poros durante a penetração do micro indentador de diamante.

O revestimento de WC-CoCr apresentou valor de desvio padrão intermediário (69,6 HV) em relação aos demais revestimentos, o que pode ser associado ao seu nível de porosidade intermediário e pela própria formação do revestimento metal – cerâmico que apresenta variação de dureza intrínseca à esse tipo de revestimento.

O menor desvio padrão observado foi para o revestimento de cromo duro (27,6 HV) indicando maior homogeneidade desse revestimento, provavelmente devido ao menor nível de poros em sua microestrutura, resultante do processo de deposição eletrolítico.

IV.3 - Determinação das densidades reais dos revestimentos depositados

São apresentados na tabela 06 os resultados das análises de picnometria realizadas nos revestimentos produzidos.

Tabela 06 - Resultados das análises de picnometria realizadas nos revestimentos.

	Cr₃C₂-NiCr	WC-CoCr	Cromo duro
Densidade Real	6,923	13,166	6,722
Desvio Padrão	0,001	0,004	0,002

Observa-se grande diferença entre os materiais depositados por HVOF. Isto se deve a diferença de densidades de cada um dos carbonetos que compõem os “cermets” analisados. O carboneto Cr₃C₂ apresenta uma densidade de 6,66 g/cm³, enquanto que o WC apresenta uma densidade de 15,63 g/cm³ [2].

IV.4 - Difração de Raios-X

O difratograma referente aos pós ao pó $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ utilizado para a aspersão térmica está apresentado na figura 23. A análise indica que além dos elementos Ni, Cr e do carboneto de cromo Cr_3C_2 ocorre a presença do carboneto Cr_7C_3 no material. Na figura 24 é apresentado o detalhe micrográfico desse pó utilizado. Na figura 25 referente ao difratograma do pó WC-CoCr verifica-se a presença de WC, CoCr, do elemento Co e de carboneto de cromo Cr_3C_2 e na figura 26 o aspecto microestrutural desse material.

Verifica-se uma menor aglutinação dos constituintes do pó de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ em relação ao pó de WC-CoCr que indica uma maior relação área/volume do $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ e portanto maior superfície exposta facilitando sua troca térmica entre chama e partícula durante a aspersão, indicando que estas partículas atingiram maiores temperaturas em relação ao WC-CoCr o que favorece maior formação de óxidos e degradação do material original .

Os difratogramas referentes aos revestimentos produzidos são apresentados nas figuras 27, 28 e 29. A análise dos difratogramas referentes aos revestimentos depositados por aspersão térmica indica que houve degradação do material depositado, em relação ao pó original, formando-se, no revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, os óxido Cr_2O_3 , CrO_3 , os carbonetos Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_2C_3 e os compostos C_6CrO_6 . No revestimento de WC-CoCr formaram-se os compostos W_2C , $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ e Cr_2WO_6 . Isto ocorre normalmente devido ao aquecimento, oxidação e descarbonetação das partículas em contato com os gases de combustão e o ar durante o processo de aspersão ^[36, 51]. Segundo a literatura, ^[50, 36] a formação do composto W_2C é prejudicial à resistência ao desgaste, já que o mesmo, apesar de apresentar maior dureza (3100HV), possui menor resistência à fratura em relação

ao WC, facilitando a clivagem desses carbonetos durante o processo de desgaste abrasivo. Verifica-se também a presença de um curva saliente entre os ângulos de 30 e 50 graus para o WC-CoCr podendo indicar a presença de uma fase amorfa ou nanocristalina de cobalto supersaturado de W e C em solução sólida ^[51 - 54], que está relacionado às altas taxas de resfriamento, cerca de 1×10^6 K/s ^[55], das partículas ao atingirem o substrato, durante o processo de deposição. O difratograma do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresenta também uma curva saliente entre os ângulos de 30 e 60 graus o que pode indicar a presença de uma fase amorfa ou nanocristalina no material. A análise do difratograma do revestimento de cromo duro indica a presença de cromo metálico (Cr), óxidos de cromo Cr_2O_3 , CrO_2 e hidrogênio (H_2), proveniente do processo de eletrodeposição.

Figura 23 - Difratograma de raios-x do pó de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Figura 24 - Detalhe do pó utilizado para aspersão do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtido via MEV.

Figura 25 - Difratoograma de raios-x do pó de WC-CoCr

Figura 26 - Detalhe do pó utilizado para aspersão do revestimento de WC-CoCr, obtido via MEV.

Figura 27 - Difratoograma de raios-x do revestimento de WC-CoCr

Figura 28 - Difratoograma de raios-x do revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Figura 29 - Difratoograma de raios-x do revestimento de cromo duro

IV.5 - Ensaios de desgaste abrasivo com areia seca e roda de borracha conforme a norma ASTM G 65-94

A morfologia arredondada dos grãos da areia utilizada no ensaio acarreta menores taxas de desgaste, se comparado ao uso de abrasivos angulares, e o fenômeno de rolamento das partículas na interface corpo de prova – disco de borracha.

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivos a baixas tensões, conforme norma ASTM G65-94 procedimento A para os revestimentos analisados são apresentados na figura 30.

Figura 30 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM G 65-94 procedimento A, para os três revestimentos analisados.

Verifica-se, por meio dos dados de perda de volume, que o material WC-CoCr apresentou o melhor desempenho nas condições de ensaio empregadas. Pela análise por MEV e Microscopia óptica (figuras 31 e 32), das superfícies desgastadas verifica-se que o mecanismo dominante de desgaste neste revestimento foi por arrancamento dos carbonetos, a partir de pequenas remoções

pelo desgaste do aglomerante CoCr a seu redor, expondo parte dos carbonetos na superfície, o que é ainda mais facilitado em regiões de poros. Tal mecanismo ocorre devido à alta dureza dos carbonetos de tungstênio presentes no revestimento (superior a dureza do abrasivo areia) e por sua alta compactação que resulta em menor distância entre as partículas de carbonetos (inferior ao tamanho do abrasivo), dificultando a remoção ou desgaste do material ligante de menor dureza ($<100\text{HV}$)^[2] em relação ao abrasivo. Desta forma temos uma pequena taxa de desgaste. Um fator que pode influenciar no desempenho dos revestimentos aspergidos é a resistência coesiva da camada (força de adesão entre as lamelas)^[36]. Isto é influenciado principalmente pelo nível de oxidação das partículas durante o processo de aspersão. Como pode ser verificado na figura 33, o revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, com um maior índice de poros e óxidos interlamelares, apresentou a maior perda de volume dentre os revestimentos analisados, uma vez que as perdas de material ocorrem principalmente pelo processo de destacamento das partículas depositadas, o que é facilitado pela sua menor resistência coesiva, se comparada ao WC-CoCr e menor dureza dos seus constituintes.

O revestimento de cromo duro apresentou nível de desgaste intermediário dentre os revestimentos estudados, sendo que o mecanismo predominante foi o de riscamento ou baixas tensões, o que pode ser verificado a partir da análise da superfície desgastada. Os pontos de penetração e mudanças de trajetórias dos riscos sobre a superfície indicam rotação das partículas abrasivas, (figura 34) evidenciando o mecanismo de desgaste a três corpos. Os riscos presentes na superfície respondem pela maior parte do material removido da amostra durante o processo de desgaste. O mecanismo de riscamento é favorecido para este material, em relação aos depositados por HVOF devido a sua relação com a dureza do abrasivo (H_a (dureza do abrasivo) / H_m (dureza do material) apresentar maior valor se comparado aos carbonetos presentes nos revestimentos depositados por HVOF.

As figuras 31 a 34 apresentam as superfícies dos revestimentos após ensaio conforme norma ASTM G65-94 procedimento A.

Figura 31 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste

Figura 32 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste

Figura 33 - Detalhe da superfície da liga $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste

Figura 34 - Detalhe da superfície da liga cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste.

IV.6 - Ensaio de desgaste abrasivo a alta tensão (ASTM B 611 modificado)

A morfologia dos grãos da alumina, com arestas agudas, o que juntamente com a maior dureza deste (superior à dureza da areia) favorece maiores taxas de desgaste em relação ao ensaio de areia seca sobre roda de borracha. A relação entre dureza do abrasivo e dureza dos materiais ensaiados (entre 1,4 e 1,9) indica taxas de desgaste elevadas.^[35, 36]

São apresentados de forma simplificada na tabela 07 os parâmetros utilizados nos ensaios conforme norma ASTM B 611 com procedimentos modificados 1 e 2 e utilizados no presente ensaio.

Tabela 07 – Parâmetros para os ensaios conforme procedimentos modificados 1 e 2.

	Força Normal	Rotação do disco (rpm)	Nº de revoluções do disco	Abrasivo
Procedimento 1	94,8 N	100	200	Alumina 30 mesh
Procedimento 2	196,2 N (20 kgf)	100	500	Alumina 30 mesh

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo conforme norma ASTM B 611 com procedimento modificado 1 para os revestimentos analisados são apresentados na figura 35.

Figura 35 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM B 611 com procedimento 1 modificado, para os três revestimentos analisados.

Pela análise dos valores de perda de volume verifica-se que o material WC-CoCr apresentou o melhor desempenho quanto ao desgaste abrasivo nas condições de ensaio segundo procedimento 1. Isto se deve a sua maior dureza, presença de carbonetos de tungstênio com dureza de aproximadamente 2200HV homogeneamente distribuídos em uma matriz com baixos níveis de óxidos e poros. O desempenho dos revestimentos aspergidos termicamente está relacionado com a resistência coesiva da camada (força de adesão entre as lamelas) ^[36], que é influenciado pelo nível de oxidação da partícula durante o processo de aspersão. O revestimento Cr₃C₂-NiCr, devido ao seu maior índice de poros, óxidos interlamelares e menor dureza, apresentou a maior perda de volume dentre os revestimentos analisados. As fotomicrografias das superfícies dos revestimentos ensaiados são apresentadas nas figuras 36, 37 e 38.

Figura 36 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.

Figura 37- Detalhe da superfície da liga Cr₃C₂-NiCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.

Figura 38- Detalhe da superfície da liga Cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 1.

Verifica-se pela análise das superfícies desgastadas apresentadas nas figuras 36 a 38 que nestas condições de carga, ocorrem tanto o arraste quanto a rotação do abrasivo em relação à amostra e ao disco, gerando riscos (causados pelo arraste) e pontos de penetração do abrasivo (causados pela rotação) sobre a superfície ensaiada, caracterizando um mecanismo de desgaste a três corpos. Os mecanismos de lascamento e sulcamento pela deformação plástica do revestimento estão presentes na superfície desgastada (figura 36) caracterizando o processo como desgaste a alta tensão.

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo conforme norma ASTM B 611 com procedimento modificado 2 para o revestimento analisado são apresentados na figura 39.

Figura 39 - Gráfico de perda de volume obtido em ensaio, conforme norma ASTM B 611 com procedimento 1 e 2 modificados, para o revestimento WC-CoCr.

Pela análise dos valores de perda de volume do revestimento WC-CoCr referente ao ensaio conforme procedimento modificado 2 verifica-se que a taxa de remoção de material é aproximadamente 5 vezes superior ao procedimento 1, devido ao aumento da força normal sobre a superfície ensaiada e ao tempo de ensaio. Este aumento deve-se também a mudança no mecanismo de desgaste, que pode ser evidenciado pela análise das superfícies desgastadas. A superfície do revestimento ensaiado conforme o procedimento 2 apresenta (figuras 40 e 42) maior quantidade de sulcos no sentido de deslocamento do disco, sendo estes mais finos. Isto indica que a maior carga aplicada leva a um maior nível de fratura do abrasivo, o que reduz a largura dos sulcos. A maior quantidade de sulcos, juntamente com uma redução dos pontos de penetração do abrasivo indica que o mecanismo de abrasão a dois corpos se sobrepõe ao mecanismo a três corpos, diferentemente do verificado no procedimento 1 (figura 41). O mecanismo de desgaste a dois corpos mostrou-se mais agressivo na remoção de material dos corpos de prova em relação ao mecanismo de desgaste a três corpos. Os

mecanismos de lascamento e sulcamento continuam presentes nas superfícies desgastadas, característica do processo de desgaste a alta tensão.

Figura 40 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, obtida por microscopia eletrônica de varredura, após ensaio de desgaste conforme procedimento modificado 2.

Figura 41 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, após ensaio de desgaste abrasivo, conforme procedimento modificado 1.

Figura 42 - Detalhe da superfície da liga WC-CoCr, após ensaio de desgaste abrasivo, conforme procedimento modificado 2.

IV.7 - Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo

Os resultados dos ensaios de desgaste micro abrasivos dos revestimentos analisados são apresentados na figura 43. Nas figuras 44 a 49 verifica-se as calotas produzidas nesse tipo de ensaio.

Figura 43 - Gráfico de perda de volume x distância do ensaio "calotest" para os três revestimentos estudados.

Figura 44 - Calota sobre o revestimento de Cr₃C₂-NiCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Figura 45 - Detalhe da superfície do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Figura 46 - Calota sobre o revestimento de WC-CoCr , obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Figura 47 - Detalhe da superfície do revestimento WC-CoCr, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Figura 48 - Calota sobre o revestimento de cromo duro, obtida por microscopia óptica, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Figura 49 - Detalhe da superfície do revestimento de cromo duro, obtida por MEV, após ensaio de desgaste tipo "calotest".

Verifica-se, por meio dos dados de perda de volume (figura 43), que o revestimento composto de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresenta a menor perda de volume, mantendo esta em torno de $0,003 \text{ mm}^3$ durante todo ensaio, e pela análise das superfícies desgastadas (figura 44 e 45) verifica-se que o principal mecanismo atuante neste caso foi adesivo, com o material da esfera aderindo a regiões da superfície da calota, e não por micro-corte ou riscamento como nos outros revestimentos ensaiados, o que impossibilita uma análise comparativa direta. Isto ocorreu devido a não formação de um filme de lama micro-abrasiva entre a amostra e a esfera, impedindo que a maior parte das partículas de diamante atuassem no tribossistema. Isto se deve principalmente a dois fatores, a alta tensão de contato entre amostra e esfera (aproximadamente $1,3 \times 10^{13} \text{ Pa}$, calculado para a área da calota observada) e pelos poros presentes neste revestimento, de maior dimensão em relação ao abrasivo, funcionaram como regiões de acúmulo para o abrasivo, dificultando a formação do filme micro-abrasivo conforme esquematizado na figura

50^[42]. O conseqüente contato metal-metal, juntamente com a elevada tensão de contato promoveu a remoção de parte do material da esfera pelos carbonetos de cromo de elevada dureza (aproximadamente 1400HV) presentes na superfície ensaiada, e de maior dureza em relação ao material da esfera e conseqüente adesão do material sobre a superfície da calota, que impediu a continuação do processo de desgaste do revestimento.

Figura 50 - Esquema representativo proposto para o contato entre esfera e revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ^[42]

Para o mecanismo de desgaste micro-abrasivo, o revestimento de WC-CoCr depositado por HVOF apresentou desempenho superior ao do cromo duro. Isto se deve provavelmente a maior dureza do revestimento de WC-CoCr se comparado ao cromo duro. As superfícies desgastadas em todos os casos apresentam riscos com

maiores larguras em relação ao abrasivo utilizado (diamante 1 micrometro). Isto se deve à adição à lama abrasiva, dos materiais removidos da superfície da esfera e da calota, de maior granulometria em relação ao abrasivo utilizado. A atuação destes materiais, agregados ao diamante promoveu os cortes dos materiais dos revestimentos.

É apresentada na figura 51 a variação do coeficiente de desgaste k com o tipo de ensaio realizado e o material ensaiado para a condição de maior distância percorrida. Verifica-se que, independentemente do material ensaiado, ocorre uma maior agressividade do ensaio realizado conforme norma ASTM B611 com procedimentos modificados P1 e P2, em relação aos demais (ASTM G65 e "Calotest"). Os valores de k apresentam variação de duas ordens de grandeza (revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) a três ordens de grandeza (revestimentos de Cromo duro e WC-CoCr) para os ensaios realizados conforme ASTM B611 e ASTM G65. Comparativamente entre os ensaios realizados conforme ASTM B611 e "Calotest" verifica-se uma variação do coeficiente de desgaste k de quatro ordens de grandeza. A variação do coeficiente de desgaste, conforme o tipo de ensaio se deve principalmente ao tipo de abrasivo utilizado, suas durezas e a geometria das partículas abrasivas^[34,35,56], combinados aos diferentes pares tribológicos utilizados em cada ensaio, (borracha – revestimento, para o ensaio conforme ASTM G65; aço AISI 1020 – revestimento, para o ensaio conforme ASTM B611; e aço AISI 52100 temperado e revenido – revestimento, para o ensaio "calotest"). Os materiais em contato com as amostras em cada ensaio geram tensões sobre as superfícies ensaiadas, que variam com o grau de deformação sofrido pelo material.

Figura 51 - Coeficiente de desgaste k , conforme ensaio, para as três composições estudadas.

V – CONCLUSÕES

- Foram obtidas, pelo processo HVOF, camadas densas, com baixos níveis de porosidades e durezas elevadas, da ordem de 1300 HV e 945 HV, para os casos do WC-CoCr e $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, respectivamente.
- Para os ensaios realizados conforme norma ASTM B611 modificados os mecanismos de lascamento e sulcamento presentes nas superfícies desgastadas, indicaram um processo de desgaste a alta tensão, sendo que o aumento da força normal sobre a amostra causou a transição do processo de desgaste a dois corpos para três corpos;
- O revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresentou desempenho geral inferior ao do cromo duro. Apenas no caso do desgaste microabrasivo, onde o mecanismo de desgaste apresentado no mesmo foi misto adesivo-abrasivo, ao contrário dos demais que tiveram características abrasivas, sua resistência ao desgaste foi superior a dos demais;
- O revestimento de WC-CoCr depositado pelo processo HVOF apresentou o maior nível de dureza entre os revestimentos estudados bem como um desempenho superior ao do cromo duro depositado por processo eletrolítico nos três tipos de ensaio de desgaste abrasivo realizados no presente trabalho, mostrando-se portanto, como uma alternativa promissora para substituição do mesmo.

VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, WC-CoCr e Cromo duro em diversos meios;
- Caracterização dos revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, WC-CoCr e Cromo duro quanto à resistência à erosão;
- Caracterização dos revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, WC-CoCr e Cromo duro quanto à resistência ao desgaste adesivo;

VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SCHIMIDT, G. et al - "Characterization of wear protective coatings". Tribology International, v29, n3, 1996, p. 207.
- [02] ASM Handbook - vol 18 p.829-834
- [03] AMADA, S. - "Tribology of Thermal Sprayed Coatings". Japanese Journal of Tribology, v. 40, n.8, 1995, p. 701,707.
- [05] TAN, J. C. et al - "Component repair using HVOF thermal spraying". Journal of Materials Processing Technology, 92-95, 1999, p. 203.
- [06] AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. In: Thermal Spraying Practice, Theory and Applications, 1985.
- [07] METALS HANDBOOK, 9a ed., vol 3, 1980.
- [08] CORTÉS, R.S. – "Estudos de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão". Marinha, Tese de D.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.
- [09] PAWLOWSKI, L. – "The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings". Wiley Publishing, 1995.
- [10] LIMA, C. C., TREVISAN, R. – "Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações". Artliber Editora, 2001.
- [11] DUCOS, M.; Durant, J.P. - "Thermal coatings in Europe: A Business Perspective". ASM International, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 10, (2001), p.407-411.
- [12] KREPSKI, R. P. - "Thermal Spray Coatings Applications in the Chemical Process Industries". NACE International, 1993.
- [13] BERNECKI, T.F. - "Coatings for Aggressive Environments". Workshop by Northwestern University Basic Industries Research Laboratories: ASM Materials Congress, Indianapolis, October, 1989.
- [14] CORTÉS, R.S., CAVALCANTI, E.H., PIZA, M.T., et al. - "Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio através do Ensaio

- de Salts Spray", IV Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Santiago, Chile, 1999.
- [15] AHMED, I; BERGMAN, T.L. - "Three-dimensional simulation of thermal plasma spraying of partially molten ceramic agglomerates". ASM International, Journal of Thermal Spray Technology, 2000, vol. 9, p.215-224
- [16] LEGG, K. D. et al, - "The replacement of electroplating". Surface and Coatings Technology, 1996, v. 81, p. 99.
- [17] NATISHAN, P. M. et al - "Salt fog corrosion behavior of high-velocity-oxygen-fuel thermal spray coatings compared to electrodeposited hard chromium". Surface and Coatings Technology, 2000, v 130, p. 218-233.
- [18] NASCIMENTO, M.P.; SOUZA, R.C.; MIGUEL, I.M.; PIGATIN, W.L.; VOORWALD, H.J.C. - "Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel". Surface and coating technology, 2001, v.138, p. 113-124
- [19] RASTEGAR, F. et al - "Alternative to chrome: HVOF cermet coatings for high horse power diesel engines". Surface and Coatings Technology, 1997, v. 90, p. 156.
- [20] WANG, B-Q et al - "The erosion-oxidation behavior of HVOF Cr_3C_2 - NiCr cermet coating". Wear, 1994, v.174, p. 177.
- [21] FUKUMOTO, M. et al - Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface, Journal of Thermal Spray Technology, September, 1999, V.8(3), p. 427.
- [22] PARKER, D. W. et al - "HVOF - SPRAY TECHNOLOGY - Poise for Growth". Advanced Materials and Processes, 1991, v. 4, p. 68.
- [23] LIAO H. et al, - Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings, Surface and Coatings Technology, 2000, v.124, p. 235.
- [24] THORPE, R. et al - "HVOF Thermal Spray Technology, Advanced Materials e Processes", 2000, p. 27-28.
- [25] SARTWELL, B. D. - "Naval Research Laboratory". The hard chrome alternatives team.
- [26] AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM G40-90a - Standard terminology Relating to Wear and Erosion. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1990, p. 150-155.
- [27] GARH, K. H. Z. - "Microstructure and Wear of Material", New York, Elsevier, 1987, v.10, p.559

- [28] RABINOWICZ, E. - Friction and wear of materials. New John Wiley & Sons, INC, 1965, Cap: 5 e 7.
- [29] DAVIES, V. H. & BOLTON, L. A. - "The mechanics of wear". Weld surfacing and hardfacing. The Welding Institute, 1980, p. 88.
- [30] PETERSON, M. B. - "Classification of wear processes". In: Peterson, M. B. & Winer, W. O., coords. Wear control Handbook. ASME, New York., 1980, p. 9-15.
- [31] TUCKER Jr., R. C. - "Wear failures". In: Metals Handbook Ninth Edition: failure analysis and prevention, 1986, v. 11, ASM, USA.
- [32] MISRA, A. & FINNIE, J. - "A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester". Wear, 1980, v.60, p. 111-121.
- [33] TYLCZAK, J. H. & ALBANY, O. - "Abrasive Wear". In: ASM Handbook; Friction Lubrication and Wear Technology. ASM International, 1992, v. 18 p. 184-190.
- [34] NATHAN, G. K. & JONES, W. J. D. Influence of the hardness of abrasives on the abrasive wear of metals. Institution of Mechanical Engineers, 1967, v. 181 n. 30, p. 215-221.
- [35] WAINER, E.; BRANDI, D. S.; HOMEN, F. D. - "Soldagem Processos e Metalurgia". Ed. Edgard Blucher, SP, Brasil, 1992.
- [36] BOZZI, A. C.; MELLO, J. D. B. - "Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion". Wear 233-235, 1999, p. 575-587.
- [37] NOBLE, D. N. - "Factors which affect abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits". The welding institute, 1984, p. 26.
- [38] CZICHOS, H. - "A systems analysis data sheet for friction and wear test and na outline for simulate testing", 1977, Wear, v. 41, p. 45-55.
- [39] KUSANO, Y.; ACKER, K.V.; HUTCHINGS, I.M. - "Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates". Surface and coating technology, 2004, v.183, p.312-327.
- [40] SHIPWAY, P.H. - "The role of test conditions on the microabrasive wear behaviour of soda-lime glass". Wear 233-235, 1999, p.191-199.
- [41] RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I. M. - "Theory and Aplication of a micro-scale abrasive wear test". Reprint from Journal of Testing and Evaluation (1997) p. 250-260.
- [42] STACK, M.M.; MATHEW, M. - "Micro-abrasion transitions of metallic materials". Wear 255, 2003, p.14-22.

- [43] RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I.M. - "A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems". Surface and coatings technology, 1996, v.79, p. 231-239.
- [44] TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M. - "Three-body abrasive wear testing of soft materials". Wear 233–235, 1999, p. 209–221
- [45] ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. - "Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and materials hardness". Wear, Artigo in press, 2004, pp. 1-4.
- [46] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM G 65. "Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus". Reprinted from the Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1994, p. 01-12.
- [47] BUDINSKI, K. G. – "Wear testing". In: BELYI, V. A.; LUDEMA, K. C.; e MYSHKIN, N. K., coords. Tribology in the USA and the former Soviet Union: Studies and application, 1994, New York. Allerton Press, Inc.
- [48] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B611 Standard test method for abrasive resistance of cemented carbides. Reprinted from the Annual book of ASTM standards, 1996, Philadelphia. p. 01-02.
- [49] OGRAMAC IND. E COM. LTDA - "Referência de custo para revestimentos por aspersão térmica". Material WC-CoCr e Cr₃C₂-NiCr, 2005.
- [50] ANDERSON, M.; CHIOVELLI, S. - "The Use of Tungsten Carbide Materials for Oil and Gas Wear Applications". Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, Published by ASM International, Materials Park, 2003, Ohio, USA.
- [51] LIAO, H.; Normand, B.; CODDET, C. – "Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings". Surface and Coatings Technology, 2000, v.124, p.235–242.
- [52] STEWART, D. A.; SHIPWAY, P.H.; MCCARTNEY, D.G. - "Influence of heat treatment on the abrasive wear behaviour of HVOF sprayed WC–Co coatings". Surface and Coatings Technology, 1998, v.105, p. 13–24.
- [53] STEWART, D. A.; SHIPWAY, P.H.; MCCARTNEY, D.G. - "Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC–Co coatings", 1999, Wear 225–229, p. 789–798.
- [54] VERDON, C.; KARIMI, A.; MARTIN, J. L. – "Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear

resistance". Materials Science and Engineering A-234-236, 1997, p. 731-734.

- [55] KEPSKI, R. P. - "Thermal Spray Coatings applications in Chemical process Industries". Materials Technology Institute, St. Louis, USA, 1993, p. 252.
- [56] WIROJANUPATUMP, S.; SHIPWAY, P.H. - "A direct comparison of wet and dry abrasion behaviour of mild steel". Wear 233-235, 1999, p.655-665.
- [57] SWEDISH STANDARDS INSTITUTION. "Surface preparations standard for painting steel surfaces".
- [58] AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM E 384. "Standard test method for microindentation hardness of materials ". Reprinted from the Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1994.