



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento

GUSTAVO PORTELA DE DEUS

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior.

Dissertação nº 35 / PPGCEM

Agosto de 2008

Natal-RN

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM

Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento

GUSTAVO PORTELA DE DEUS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior

Natal-RN

Agosto de 2008

D486a Deus, Gustavo Portela
Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento./Gustavo Portela de Deus – Natal. 2008
110 p.:il..

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM – 2008

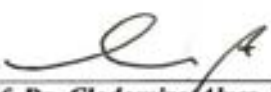
Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior

1. Desgaste abrasivo, 2. Soldagem de revestimento, 3. Aspersão térmica. I Título

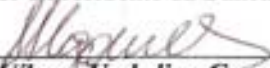
CDD: 628.3

ATA DE REALIZAÇÃO DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE Mestrado DO CANDIDATO AO TÍTULO DE MESTRE DO ALUNO GUSTAVO PORTELA DE DEUS

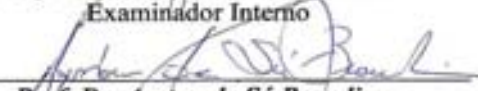
Aos vinte e dois dias do mês de agosto do ano de dois mil e oito, às oito horas no Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Piauí, instalou-se a Banca Examinadora de Defesa de Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais do candidato **Gustavo Portela de Deus**. A Banca Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior (Orientador e Presidente da Banca) - UFRN; Uilame Umbelino Gomes (Examinador Interno - UFRN); Ayrton de Sá Brandim (Examinador Externo - CEFET/PI); Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa (Examinador Externo - CEFET/PI) e Valdemar Silva Leal (Examinador Externo - UEMA). Encontrava-se presente um público de professores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e outras pessoas da comunidade universitária e externa. O Presidente da Banca Examinadora abriu a sessão apresentando os membros da Banca Examinadora e após breves palavras solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da sua Dissertação sob o título "**Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento**", marcando o tempo de cinquenta minutos para a apresentação e logo após este tempo, o Presidente da Banca Examinadora passou a palavra aos examinadores para arguição do candidato. O Orientador também fez sua arguição. Após o término das arguições o Presidente da Banca Examinadora solicitou ao público presente que se retirassem do recinto para que a Banca Examinadora procedesse à avaliação do candidato. Após a avaliação os membros da Banca Examinadora solicitaram o retorno do público ao auditório. A Banca Examinadora, através de seu Presidente, proferiu o julgamento da Defesa de Dissertação de Mestrado, sendo o candidato **Gustavo Portela de Deus** "APROVADO" com conceito "A" conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Assinam a seguir os membros da Banca Examinadora.



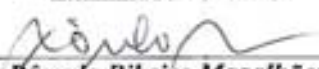
Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior
Orientador e Presidente da Banca



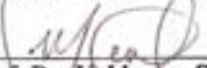
Prof. Dr. Uilame Umbelino Gomes
Examinador Interno




Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim
Examinador Externo



Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa
Examinador Externo



Prof. Dr. Valdemar Silva Leal
Examinador Externo



Gustavo Portela de Deus
Candidato

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais João de Deus e Maria das Graças, que tanto nos incentivaram para galgarmos tão elevado passo, à minha esposa Janaína, aos meus filhos Victoria e João Gustavo, que tanto contribuíram de forma direta e indireta, estimulando e dando forças quando estas se fizeram necessárias.

Desejo ainda compartilhar os eventuais méritos do trabalho com meus irmãos pelos esforços despendidos por todos quando por mim foram solicitados.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior pela sua valiosa orientação, apoio e confiança em mim depositados durante a realização deste trabalho de pesquisa.
- Ao Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim pelo estímulo, dedicação e apoio que sempre forneceu quando solicitado durante o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, pelo apoio e colaboração durante a fase de estudos interdisciplinares.
- À Paulo Roberto Rebelo Lages, pela fundamental ajuda no desenvolvimento deste trabalho.
- Aos colegas mestrandos em Engenharia de Materiais por terem compartilhado conosco os obstáculos e glórias durante o período de desenvolvimento do Mestrado.
- À Ogramac – Indústria e Comércio Ltda., pela valiosa colaboração nos revestimentos das amostras pelo processo de aspersão térmica.
- A Engincom Indústria e Comércio Ltda., pela valiosa colaboração nos revestimentos das amostras pelo processo de soldagem.
- Aos colegas do CEFET-PI pelo apoio e disponibilidade.
- Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Piauí – CEFET-PI por nos fornecer esta possibilidade de desenvolver este trabalho de pesquisa científica, especialmente na pessoa do Sr. Diretor Geral Francisco das Chagas Santana, que não mediu esforços para nos atender nesta contenda.

RESUMO

O objetivo principal do trabalho é analisar a resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão dos elementos que compõem os órgãos de máquinas rodoviárias que estão expostos diretamente ao contato com abrasivos. Estas análises foram efetuadas após estes elementos serem revestidos superficialmente pelo processo de soldagem com eletrodo revestido (SAER) manual e pelo processo de revestimento por aspersão térmica tipo LVOF. Como também visa apresentar sugestões para um melhor aproveitamento e rendimento destes elementos, quais sejam, diminuindo custos e evitando paralisações nas frentes de serviço. Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de um substrato de aço carbono ABNT 1045 temperado, seguindo as mesmas especificações e composições dos metais constituintes das ligas e foi seguida a norma que regulamenta as dimensões destas amostras e de acordo com a grandeza correspondente. Os resultados foram avaliados por meio de ensaios de dureza, resistência ao desgaste por abrasão à baixa tensão e pela perda de volume associando a microestrutura dos revestimentos analisados.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, soldagem de revestimento e aspersão térmica.

ABSTRACT

The main objective is to analyze the abrasive wear resistance to the low stress of the elements that make up the organs of road machinery that are exposed directly to contact with abrasives. These samples were analyzed after these elements are coated superficially by the process of welding electrode coated with (SAER) and the manual process of coating type LVOF thermal spraying. As well, is to provide suggestions for a better recovery and return of these elements, which are reducing costs and avoiding downtime in the fronts of service. The samples were made from a substrate of carbon ABNT 1045 tempered steel, following the same specifications and composition of metals and alloys of constituents was followed the standard governing the dimensions of these samples and in accordance with the corresponding size. The results were evaluated by testing the hardness, abrasion resistance to wear by the low stress and the loss of volume involving the microstructure of coatings analyzed.

Keywords: Wear abrasive, welding, hardfacing and thermal spraying

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caçamba de pá carregadeira com lâmina e dentes desgastados	20
Figura 2.2 – Caçamba de pá carregadeira com lâmina e cantos desgastados	20
Figura 2.3 – Participação percentual dos diversos tipos de desgaste.....	22
Figura 2.4 – Desgaste abrasivo a dois corpos.....	23
Figura 2.5 – Desgaste abrasivo a três corpos.....	24
Figura 2.6 – Influência do tamanho do grão abrasivo na taxa de desgaste.....	35
Figura 2.7 – Efeito da carga aplicada sobre o desgaste abrasivo.....	37
Figura 2.8 – Efeito da dureza do material abrasivo sobre o desgaste.....	39
Figura 2.9 – Efeito da temperatura no desgaste abrasivo.....	40
Figura 2.10 – Esquema sobre a deposição das partículas sobre o substrato.....	46
Figura 2.11 – Esquema de uma seção de um revestimento aspergido.....	48
Figura 2.12 – Velocidade de impacto média das partículas.....	49
Figura 2.13 – Esquemática de um equipamento típico para aspersão térmica por combustão.....	50
Figura 2.14 – Esquemática de uma tocha para aspersão por chama.....	50
Figura 2.15 – Esquemática de uma tocha para aspersão térmica de pó à chama.....	53
Figura 2.16 – Esquemática de tocha de detonação.....	55
Figura 2.17 – Esquemática de tocha para aspersão a arco elétrico.....	56
Figura 2.18 – Esquemática de sistema de aspersão térmica a plasma.....	57
Figura 3.1 – Vista lateral de uma unha de pá carregadeira.....	70
Figura 3.2 – Vista de topo de uma unha de pá carregadeira.....	71
Figura 3.3 – Sistema de peneiramento da areia para o ensaio de abrasão.....	80
Figura 3.4 – Abrasômetro de Roda de Borracha.....	81
Figura 3.5 – Durômetro.....	83

Figura 4.1 – Imagens de corpos de prova desgastados no ensaio de abrasão.....	91
Figura 4.2 – Gráfico da perda de volume dos corpos de prova desgastados pelo ensaio de abrasão.....	93
Figura 4.3 – Comparação dos valores médios de dureza entre os materiais estudados.....	94
Figura 4.4 – Representação gráfica da microdureza da amostra tipo M.....	95
Figura 4.5 – Representação gráfica da microdureza da amostra tipo P.....	95
Figura 4.6 – Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. Ataque colorido. 50X.....	96
Figura 4.7 – Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. Ataque colorido. 100X.....	97
Figura 4.8 – Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. A presença de áreas esbranquiçadas que possivelmente possam ser os carbetos de tungstênio. Ataque colorido. 200X.....	97
Figura 4.9 – Microestrutura eutética com presença de carbetos complexos de cromo do tipo M_7C_3 . Ataque colorido. 200X.....	100
Figura 4.10 – Microestrutura eutética com presença de carbetos complexos de cromo do tipo M_7C_3 . Ataque colorido. 500X.....	101
Figura 4.11 – Diagrama de equilíbrio Fe-Cr-C.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Processos de aspersão térmica.....	49
Tabela 2.2 – Temperatura das fontes de calor.....	51
Tabela 2.3 – Ligas e principais elementos de liga para revestimento duro.....	66
Tabela 2.4 – Guia para seleção de ligas para recobrimento duro.....	71
Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens dos processos para revestimentos de superfícies.....	75
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão à baixa tensão realizada com o aço ABNT 1015 para obtenção do coeficiente de variações do Abrasômetro.....	94
Tabela 4.2 – Determinação da perda de massa e de volume após o ensaio de desgaste.....	95
Tabela 4.3 – Valores médios de dureza para os corpos-de-prova em estudo.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

H	-	Entalhe/recorte da dureza
E	-	Módulo de Young
ν	-	Coefficiente de Poisson
K	-	Constante
σ	-	Tensão de escoamento
α	-	Coefficiente de <u>encruamento</u>
ξ	-	Deformação verdadeira
A	-	Constante
PV	-	Perda de volume
PM	-	Perda de massa
α	-	Densidade do material
M _i	-	Massa do corpo de prova antes do ensaio
<u>M_f</u>	-	Massa do corpo de prova depois do ensaio
ΔM	-	Diferença de massa antes e após o ensaio

SUMÁRIO

1 – Introdução	14
2 – Revisão Bibliográfica	19
2.1 – Tipos de Desgaste.....	21
2.2 – Desgaste por Abrasão.....	21
2.3 – Tipos de Processos Abrasivos.....	22
2.4 – Tipos de Abrasão.....	24
2.4.1 – Goivagem.....	24
2.4.2 – Abrasão por Alta Pressão.....	25
2.4.3 – Abrasão por Riscamento ou à Baixa Pressão.....	26
2.4.3.1 – Fatores que Aceleram o Desgaste por Abrasão.....	27
2.4.3.2 – Considerações Sobre os Abrasivos.....	29
2.4.3.3 – Mecanismos Envolvidos no Desgaste Abrasivo.....	29
2.4.3.3.1 – Sistemas Tribológicos Envolvidos em Desgaste Abrasivo.....	31
2.5 – Variáveis que Podem Influenciar os Mecanismos de Desgaste Abrasivo.....	32
2.5.1 – Efeito da Dimensão do Grão Abrasivo.....	34
2.5.2 – Carga Aplicada.....	35
2.5.3 – Influência da Dureza.....	38
2.5.4 – Influência da Temperatura.....	39
2.6 – Propriedades Mecânicas do Metal que Influem no Desgaste.....	40
2.7 – Estrutura Metalúrgica – Influência do Desgaste.....	44
2.8 – Revestimentos Superficiais.....	45

2.8.1 – Aspersão Térmica.....	46
2.8.1.1 – Processos.....	50
2.8.1.1.1 – Processos por Combustão.....	50
2.8.1.1.1.1 – Arames e Varetas.....	51
2.8.1.1.1.2 – Pó.....	51
2.8.1.1.2 – Detonação.....	54
2.8.1.1.3 – Processos Elétricos.....	55
2.8.1.1.3.1 – Arco Elétrico.....	55
2.8.1.1.3.2 – Arco Plasma Não-Transferido.....	56
2.8.1.1.3.3 – Arco Plasma Transferido.....	58
2.8.1.2 – Preparação da Superfície.....	58
2.8.1.3 – Limpeza e Manuseio.....	59
2.8.1.3.1 – Métodos de Remoção de Contaminantes.....	59
2.8.1.4 – Criação de Rugosidade.....	60
2.8.2 – Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste.....	60
2.8.2.1 – Recobrimento Duro.....	61
2.8.2.2 – Classificação dos Materiais para Recobrimento Duro.....	61
2.8.2.3 – Seleção do Material para o Recobrimento Duro.....	64
2.8.2.4 – Pontos Necessários para a Seleção do Material do Recobrimento.....	64
2.9 – Tipos de Revestimento.....	65
2.9.1 – Guia para Seleção de Ligas para Recobrimento Duro.....	65
2.9.2 – Vantagens e Desvantagens dos Processos para Deposição de Revestimento de Superfícies.....	66
3 – Materiais e Métodos.....	69
3.1 – Fluxograma de Desenvolvimento Experimental.....	69

3.2 – Critérios de Seleção dos Elementos de Penetração no solo de Equipamentos Rodoviários.....	70
3.2.1 – Técnicas Utilizadas nas Aplicações dos Revestimentos.....	72
3.2.1.1 – Revestimento Duro por Processo de Soldagem.....	72
3.2.1.2 – Revestimento Superficial por aspersão através das técnicas HVOF e LVOF.....	74
3.2.1.3 – HVOF (High Velocity Oxigen Fuel)	74
3.2.1.4 – LVOF (Low Velocity Oxigen Fuel) Flame Spray-Pó	76
3.2.1.5 – LVOF (Low Velocity Oxigen Fuel) Flame Spray-Arame	76
3.2.2 – Materiais.....	77
3.2.2.1 – Material de Referência.....	77
3.2.2.2 – Material de Base dos Processos por Soldagem e por Aspersão.....	77
3.2.2.3 – Consumíveis Utilizados.....	78
3.2.2.4 – Areia.....	79
3.2.3 – Equipamentos.....	79
3.2.3.1 – Equipamento de Soldagem.....	79
3.2.3.2 – Sistema de Peneiramento da Areia.....	79
3.2.3.3 – Abrasômetro.....	80
3.2.3.4 – Corte, Usinagem e Pesagem dos Corpos de Prova.....	82
3.2.3.5 – Durômetro.....	82
3.2.3.6 – Microscopia Ótica.....	83
3.3 – Seqüência Experimental.....	83
3.4 – Métodos.....	84
3.4.1 – Planejamento Experimental.....	84
3.4.1.1 – Ensaio de Desgaste por Abrasão à Baixa Tensão ASTM G65-91.....	84
3.4.1.2 – Microscopia Ótica.....	85

3.4.1.3 – Ensaio de Dureza.....	85
4 – Resultados e Discussões	87
4.1 – Introdução.....	87
4.1.1 – Procedimentos Adotados no Desenvolvimento do Trabalho.....	87
4.2 – Aferição e Qualificação do Abrasômetro Segundo a Norma ASTM G65-91, Procedimento A.....	89
4.3 – Resistência ao Desgaste.....	90
4.4 – Dureza.....	93
4.5 – Microdureza	95
4.6 – Análise Microestrutural.....	96
4.6.1 – Microestrutura das Amostras Aspergidas Termicamente.....	96
4.6.2 – Microestrutura das Amostras Revestidas por Soldagem	98
4.6.3 – Resultados	103
5 – Conclusões.....	105
Referências	107

Capítulo 1

Introdução

1 – INTRODUÇÃO

O elevado desgaste de material dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários é provocado, essencialmente, pelo tipo de terreno, mineral presente, resistência litológica e em função das intempéries do tempo, principalmente da umidade e da temperatura.

O rendimento apresentado por esses elementos e a vida útil oferecida estão relacionados à composição da liga constituinte do material, dos processos de tratamento térmico a que foram submetidos, como também de operações efetuadas devida ou indevidamente pelo operador do equipamento rodoviário.

Os elementos fundidos, laminados e forjados, que compõem o conjunto de componentes de penetração no solo, sofrem de forma direta a influência do desgaste abrasivo. Desgaste este, que participa em determinadas situações com até 85% (oitenta e cinco por cento) do custo de manutenção dos equipamentos rodoviários na forma rotineira (BATISTA, NASCIMENTO et al, 1999). Estes elementos, em função de serem solicitados de forma intensa ou intermitente, são consumidos ao longo do tempo. Fazendo, às vezes, paradas bruscas e inesperadas nas frentes de trabalho, ocasionando, portanto, elevação nos custos de produção.

O desgaste em componentes vitais de máquinas e equipamentos rodoviários ocorre de várias formas diferentes, como por deslizamento, por rolamento, por abrasão, por erosão, por impacto, por corrosão e por choque térmico. Já se tratando de elementos de penetração no solo, a perda de massa desses elementos é provocada quase que exclusivamente pelo desgaste abrasivo a baixa tensão, que é provocado pelo próprio material ou carga a que o equipamento

será solicitado, pelo contato com esse material e pelo movimento relativo entre as partes envolvidas no sistema. Uma maneira de identificação do desgaste abrasivo à baixa tensão é pela observação da superfície a ser analisada, se a mesma apresenta corte, riscamento ou penetração de material (GREGOLIN,1990).

Com o intuito de elevar a vida útil das ferramentas de penetração e corte nos solos e substratos rochosos, as grandes empresas fabricantes e montadoras de equipamentos rodoviários ou de terraplenagem vêm aprimorando e desenvolvendo, bem como exigindo de seus fornecedores ferramentas com características físicas e mecânicas mais resistentes ao desgaste abrasivo e ainda desenvolvendo peças e ferramentas de fácil substituição e recuperação, e já projetadas para receber recobrimentos de manutenção, tais como:

- ✚ Bordas soldáveis de meia seta – que têm como finalidade proteger a estrutura da caçamba por meio do acréscimo de material de desgaste à borda da base;

- ✚ Reforços de canto soldáveis – utilizados para proteger o canto externo inferior de todos os tipos de caçambas;

- ✚ Bloco de desgaste de “Ferro Branco” – uma liga de alto teor de cromo, denominada “Ferro Branco” é caldeada a uma chapa de reforço de aço doce que, por sua vez, pode ser soldada (solda tampão) com um eletrodo de vareta a uma caçamba, armação de lâmina ou a qualquer parte onde instalação rápida de baixo custo e proteção contra abrasão são requeridos.

Outras soluções desenvolvidas e aplicadas como alternativa à proteção contra o desgaste são:

✚ Sistema de chapa de desgaste fixada mecanicamente em que fornece um meio fácil de instalação e remoção, evitando assim longas paradas para manutenção;

✚ Barras de desgaste para lâminas.

As barras de desgaste fornecem proteção adicional para a lâmina em aplicações altamente abrasivas onde se constata uma vida útil mais curta do revestimento. As barras de desgaste de lâminas são projetadas para serem soldadas sobre o revestimento normal (superfície de desgaste) da lâmina.

Considerando-se, ainda, que, por meio dos processos de fabricação convencionais e na composição de ligas, praticamente já foi esgotada a possibilidade de desenvolvimento de materiais mais resistentes ao desgaste abrasivo, a solução que se busca atualmente é o desenvolvimento de técnicas de endurecimento ou revestimento superficial, que tornem esses elementos mais resistentes ao desgaste abrasivo, tais como soldagem, *cladding*, eletrodeposição, Deposição Física de Vapor – DFV (PVD) (BARREIRA, LIMA et al, 2001), Deposição Química de Vapor – DQV (CVD), sendo a aspensão térmica a técnica que mais tem se desenvolvido ultimamente (LIMA, SOUZA et al, 2001).

A busca de informações contidas neste estudo visa avaliar e pesquisar por meio de análise de diferentes ensaios tecnológicos o melhoramento dos materiais quanto a sua resistência ao desgaste abrasivo, quando os mesmos estão em contato direto com o solo, com a finalidade de obter materiais mais resistentes ao ataque destes elementos abrasivos, além de contribuir com o desenvolvimento de produtos de qualidade superior às dos produtos oferecidos atualmente pelo mercado.

Foi analisada a viabilidade econômica, com a introdução de novas técnicas de revestimento como LVOF e revestimento por soldagem. Também foram utilizados, como

elementos de estudo, dentes de caçambas, suportes, elos segmentados de esteiras e unhas de 80escarificadores de máquinas rodoviárias.

Os elementos de penetração no solo que foram utilizados como referência na inspeção e estudo durante o desenvolvimento deste projeto são utilizados de forma intensa e ou intermitente em máquinas rodoviárias do tipo moto- niveladoras, tratores de esteiras, tratores escavo-carregadores de pneus, retroescavadeiras e escavadeiras hidráulicas de esteiras.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 - Revisão Bibliográfica

Tribologia é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas. A palavra é derivada das palavras gregas TRIBOS, que significa atrito, e LOGOS, que significa estudo, de forma que uma tradução literal significa 'estudo do atrito', ou a ciência que estuda o atrito (STOETERAU, 2001).

A tribologia envolve a investigação científica de todos os tipos de fricção, lubrificação e desgaste e também as aplicações técnicas do conhecimento tribológico (STOETERAU, 2001) Especificamente, em estudo, o desgaste é a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo com um outro corpo sólido, líquido ou gasoso (STOETERAU, PASCOALI, 2001).

O desgaste de componentes e equipamentos industriais, rodoviários e de outros tipos de atividades produtivas, representa um grande fator de depreciação de capital, de equipamento e fonte de despesas com manutenção e reposição de componentes mecânicos. As Figuras de 2.1 a 2.4 mostram componentes de estruturas de máquinas de terraplenagem desgastadas pelos efeitos da abrasão no processo tribológico.

Sobre os custos de produção estes se tornam mais elevados em decorrência da reposição das peças desgastadas ou deterioradas e da mão-de-obra para substituição, além do tempo parado dos equipamentos que deixam de produzir. Muitas vezes exige ainda o superdimensionamento de componentes influenciando ou limitando na produção dos equipamentos ou ainda provocando a paralisação destes. Estes fatores influem significativamente na elevação dos custos e no rendimento de produção.



Figura 2.1 – Caçamba de pá-carregadeira com lâmina e dentes desgastados



Figura 2.2 – Caçamba de pá-carregadeira com lâminas e cantos desgastados

“De acordo com Hawk et al (1999), o desgaste é um dos maiores problemas que aparecem em escavações, nas movimentações de terras, minerações e processamentos de minerais nas indústrias, ocorrendo em uma grande variedade de equipamentos como nas lâminas de remover terra dos tratores que fazem, por exemplo, a terraplenagem, em britadeiras, dentes escavadores, lâminas de escoamento etc. O desgaste de peças, os custos com o reparo e com a substituição destas peças, significam elevadíssimos gastos para as empresas”.

2.1 Tipos de Desgaste

Os principais tipos de desgaste observados nos componentes mecânicos são por (GREGOLIN, RIBEIRO et al, 1990):

- ✚ Abrasão – ocasionado por partículas abrasivas (duras) sob tensão, deslocando-se sobre a superfície;
- ✚ Erosão – devido ao choque contra a superfície, de partículas sólidas ou gotas líquidas presentes em correntes de fluidos;
- ✚ Cavitação – associado à formação e implosão de bolhas gasosas em correntes de fluidos, na interface líquido–metal, devido à variação súbita de pressão ao longo do percurso;
- ✚ Adesão ou fricção – resultante da fabricação metal–metal, quando superfícies ásperas deslizam entre si;
- ✚ Corrosão – quando envolve a ocorrência de reações químicas superficiais no material, além das ações mecânicas de desgaste;
- ✚ Impacto – ocasionado por choques ou cargas aplicadas verticalmente sobre a superfície.

2.2 Desgaste por Abrasão

Desgaste por abrasão ou desgaste abrasivo é a retirada de material causada pela presença de partículas duras. As partículas duras podem estar aprisionadas na interface entre as duas superfícies em movimento relativo, ou serem as protuberâncias que fazem parte da rugosidade de uma das superfícies. Acompanhada de forte pressão, ocasionada por deslocamento ou por amassamento, a retirada do metal. Tais abrasivos podem ser

representados por: vegetais ou minerais (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

A Figura 2.5 apresenta os percentuais de contribuição do desgaste abrasivo em relação aos demais tipos de desgastes. Neste, pode-se observar que o desgaste abrasivo é o de maior representatividade nas estruturas mecânicas de máquinas e equipamentos, chegando a contribuir de forma genérica com 50% em relação aos demais desgastes, revelando a importância de tal desgaste.

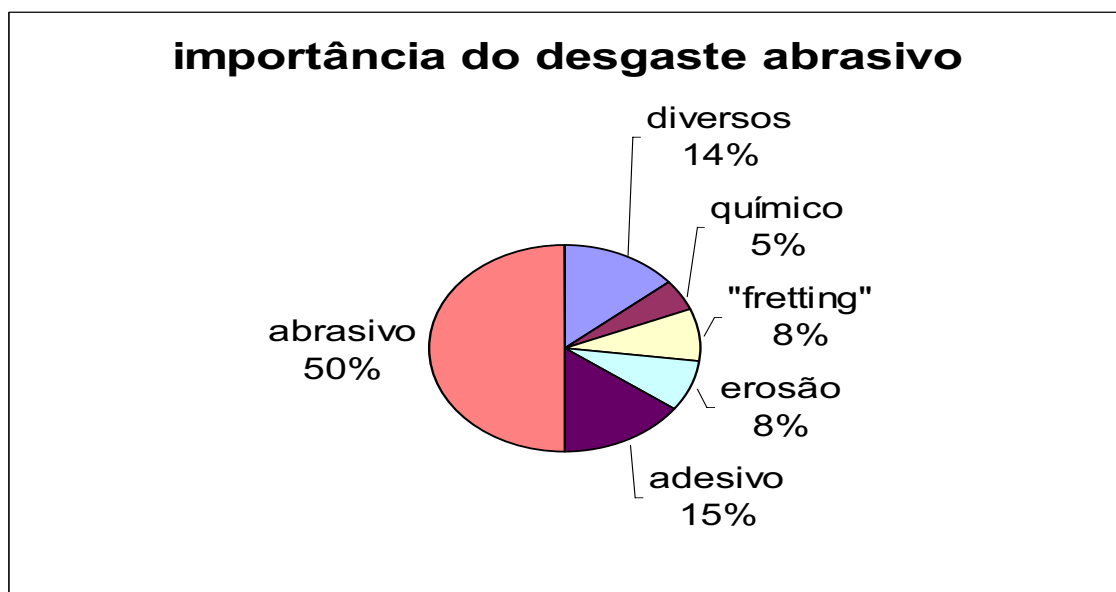


Figura 2.3 - Participação percentual dos diversos tipos de desgaste

2.3 Tipos de Processos Abrasivos

Abrasão a dois corpos

De acordo com Souza, (2002), quando uma ou mais partículas de elevada dureza são atritadas contra uma superfície, sulcando-a ou escavando-a devido à força normal aplicada, tem-se o desgaste abrasivo de dois corpos.

Abrasão a três corpos

Quando estas partículas são aprisionadas entre duas superfícies que deslizam entre si, pode ocorrer o chamado desgaste abrasivo de três corpos. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram as representações de formas de desgaste abrasivo a dois corpos e a três corpos respectivamente.

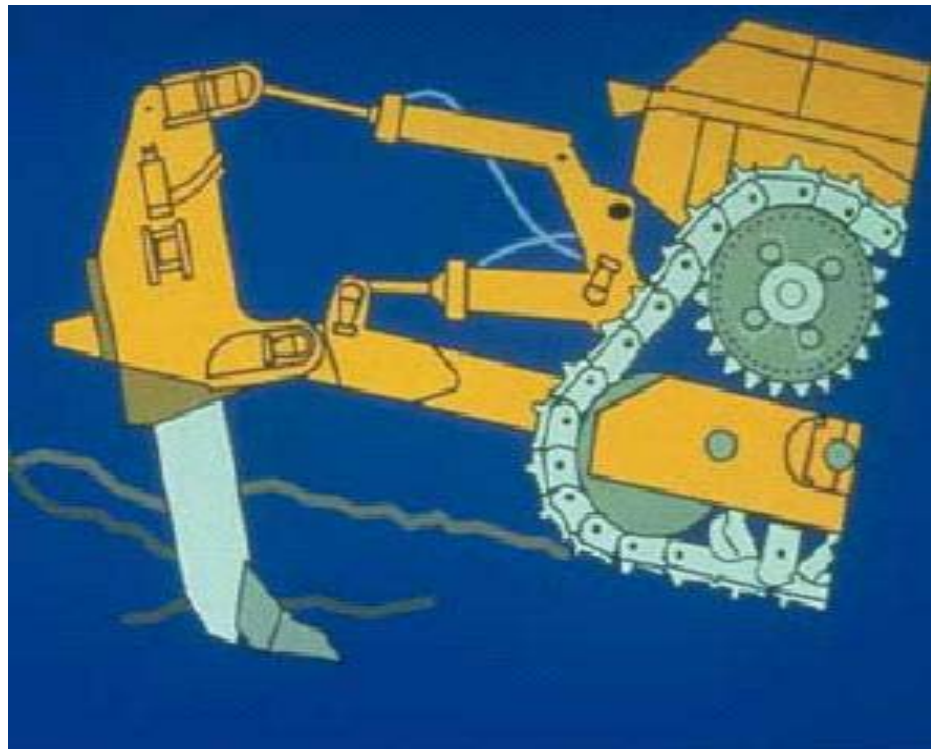


Figura 2.4 – Desgaste abrasivo a dois corpos



Figura 2.5 – Desgaste abrasivo a três corpos

Em relação ao desgaste abrasivo, é interessante ressaltar que, embora a partícula abrasiva seja mais dura que a superfície a ser desgastada, esta não é uma condição para se classificar o desgaste como abrasivo (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

2.4 Tipos de Abrasão

2.4.1 Goivagem

É o desgaste provocado por partículas grandes e grosseiras, principalmente dotadas de regiões pontiagudas cortantes com dureza maior do que a parte metálica que está sendo desgastada. Pode acontecer quando há um contato entre as partes, com pressões mais ou menos violentas e repetitivas.

Um exemplo típico de abrasão por goivagem é representado em dentes de caçambas de máquinas que operam em serviços de terraplenagem onde ocorre deslocamento de cargas como pedra e areia. Esses materiais abrasivos, em geral, de grandes dimensões e dotados de regiões pontiagudas, sob condições de altas tensões e envolvendo impacto, são fatores que propiciam a penetração mais profunda do abrasivo na superfície, provocando desgastes com a formação de sulcos profundos. Os aços austeníticos ao manganês são, em geral, as ligas preferidas para combater este tipo de desgaste (BATISTA,NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

2.4.2 Abrasão por Alta Pressão

É o desgaste que ocorre entre partículas abrasivas e o metal, ocasionando o esmagamento do abrasivo ou não. A prensagem da partícula contra o metal pode ser exercida por pressões fortes ou médias que provocam a formação de superfícies de pequenos fragmentos.

As partículas abrasivas podem ser classificadas quanto às suas dimensões, e são consideradas médias, quando inferiores a 5 cm, ou pequenas, quando menores do que 1cm. As partículas médias podem exercer a ação abrasiva superficial, arrancando fragmentos do metal, enquanto as partículas pequenas, por sua vez, provocam o desgaste.

A constituição do metal influi na forma ou resposta do desgaste provocado. Se for dúctil, terá uma abrasão que tira cavacos; se é frágil ou se torne frágil, haverá um deslocamento superficial de pequenos fragmentos. É normal que, ocasionalmente, poderão ocorrer as duas modalidades ao mesmo tempo. Exemplos das partes sujeitas ao desgaste por abrasão são: caçambas de escavação ou carga, lâminas de motoniveladoras e arados raspadores.

É o tipo de desgaste onde o material abrasivo é fragmentado durante o contato abrasivo com a superfície desgastada. As tensões envolvidas são, portanto, superiores à tensão de fragmentação do abrasivo, promovendo ainda maior penetração do abrasivo na superfície, maior deformação plástica das fases dúcteis e fratura das fases frágeis presentes no material. Tipicamente, esta forma de abrasão ocorre em equipamentos de moagem de minérios, que envolvem partículas de pequeno tamanho, em mancais contaminados com areia etc. Para prevenir este tipo de abrasão, normalmente empregam-se materiais do tipo ferros fundidos ou aço – ligas que possuem maior tenacidade (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

2.4.3 - Abrasão por Riscamento ou à Baixa Tensão

Tipo de abrasão na qual a superfície penetrante é riscada pelo material abrasivo, em decorrência de sua dureza e resistência oferecida e do próprio *stress* do metal constituinte dos componentes dos equipamentos em decorrência de seu uso que, ao penetrar na superfície, promove a remoção de material. As tensões impostas sobre as partículas abrasivas são inferiores à tensão necessária para a fragmentação destas, principalmente tratando-se de áreas de domínio do embasamento cristalino ou com predominância de rochas ígneas e/ou metamórficas que, no Nordeste, apresentam pouco desenvolvimento do solo.

Tais condições imprimem nas ferramentas de penetração esforços mais abrasivos em decorrência de essas rochas se apresentarem pouco alteradas e com elevado grau de resistência em relação a outros tipos de solo encontrados em outros ambientes geológicos. Tal como a abrasão à baixa pressão que ocorre na superfície dos componentes de equipamentos que, direta ou indiretamente, manuseiam terras, areias, cascalhos, piçarras, rochas ou minérios, tais como máquinas agrícolas, equipamentos de escavação e transporte

utilizados na indústria da construção civil, principalmente das atividades ligadas à construção, recuperação e pavimentação de estradas e dos setores de mineração, siderúrgicas etc. Com a finalidade de prevenir a ocorrência destes tipos de desgastes, empregam-se normalmente ferros fundidos com alto teor de carbono (martensíticos ou austeníticos), às vezes contendo outros elementos de liga, além de ligas de cobalto – tungstênio – carbono.

2.4.3.1 - Fatores que Aceleram o Desgaste por Abrasão

Normalmente, é sabido que partículas de grande tamanho provocam desgaste por abrasão acompanhado de impacto, isto leva a ter-se um desgaste acentuado que, na verdade, foi muito mais por impacto que por abrasão.

Partículas médias, dependendo da dureza e do formato, são menos agressivas, porém partículas finas são mais abrasivas ocasionando abrasão muito incidente. Como exemplo, pode-se citar o cimento, talco, xistos e outros que são compostos de partículas finas e altamente abrasivas. É claro que a dureza destas partículas também é significativa. A forma dos materiais abrasivos varia desde arredondados até ângulos vivos.

Os minerais mais duros possuem formações agudas, enquanto que, em contraposição, os mais dúcteis apresentam formações arredondadas. Quanto mais agudas forem as arestas, maior será a ação abrasiva. No caso de impactos ou pressões fortes, as formas agudas podem penetrar no metal, provocando um desgaste por “goivagem” ou fratura da peça. A dureza de uma liga metálica é de grande importância na resistência oposta a uma ação abrasiva. As maiores durezas correspondem a resistências maiores.

Os abrasivos menos duros terão ação menos violenta. Com referência às ligas metálicas, são encontradas, com facilidade, tabelas de dureza das várias alternativas e

também as diversas escalas de durezas com referência aos abrasivos, quando é possível conjugar proteções através de adições de películas metálicas, com finalidade de melhor proteger a peça em ação de trabalho.

Quando é possível unir uma maior dureza com uma granulação adequada serão atingidos os mais elevados índices de resistência à abrasão. Para proteger as peças dos equipamentos contra a abrasão, é importante preparar a superfície do metal, procurando deixá-la a mais lisa possível, sem protuberâncias ou rugosidades, pois a abrasão é iniciada, preferencialmente, nestas regiões. Ligas constituídas de alto teor de carvão de tungstênio e de cromo, além da elevada dureza, apresentam depósitos lisos e brilhantes compatíveis com estas características mencionadas. É natural que, quanto maior a velocidade e a frequência do contato da partícula com o metal, maior será a ação abrasiva e, conseqüentemente, o desgaste das peças. Os tamanhos dos grãos também são importantes, pois, quanto menor forem, mais a superfície será desgastada (BATISTA,NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

Baseado nas considerações acima, os principais fatores que afetam o desgaste por abrasão são as características dos abrasivos associados aos fatores externos que atuam sobre a superfície do componente. Assim, podem-se listar os seguintes fatores:

- a) Tamanho da partícula (grossa, fina ou média);
- b) Formato da partícula (angulares ou redondas);
- c) Dureza da partícula;
- d) Dureza do metal base;
- e) Acabamento do metal base;
- f) Velocidade e frequência do contato entre a partícula abrasiva e o metal base;
- g) Tamanho de grão da estrutura do metal base;

- h) Ângulo de incidência da partícula do metal base;
- i) Stress do metal constituinte das peças de equipamentos pelo uso.

2.4.3.2 - Considerações sobre os Abrasivos

As rochas são constituídas por um agregado de minerais, cujos constituintes mais comuns são os minerais de quartzo, feldspato, mica e outros, ricos em silicatos de alumínio e magnésio, muitos dos quais de elevada dureza. Ex.: granitos, areia, basalto, folhelhos, xistos, filitos, gnaises etc.

Os carbonatos são os principais constituintes dos calcários e margas e, normalmente, compõem parte dos pacotes sedimentares das formações geológicas das bacias sedimentares e são considerados produtos macios. Entretanto, comumente estes pacotes encontram-se alternados com outros de arenitos, siltitos e folhelhos.

Os minérios são compostos de óxidos, carbonetos e sulfetos. Os óxidos são, geralmente, duros (bauxita, hematita), enquanto que os sulfetos são, geralmente, macios (galena ou sulfetos de chumbo). As rochas combustíveis (hulha, turfa) e os fosfatos contêm proporções mais ou menos elevadas de sílica e alumina.

Para amenizar os gastos com o desgaste abrasivo, partiu-se para o desenvolvimento de materiais com maiores resistências ao desgaste. Assim, várias pesquisas nesta área tribológica começaram a ser desenvolvidas em cima dos diversos tipos de materiais existentes (FUSSÉ et al).

2.4.3.3 Mecanismos Envolvidos no Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser classificado como de dois ou três corpos. Na abrasão de dois corpos, as partículas abrasivas são movidas livremente sobre a superfície do

material como areia em uma calha. No desgaste abrasivo de três corpos, as partículas abrasivas agem como elementos de interface entre o corpo sólido e o contra-corpo. O desgaste quando envolve três corpos é cerca de duas a três vezes menor do que quando envolve dois corpos. Pois, no caso de três corpos, devido à variação no ângulo de ataque, apenas uma pequena porção das partículas causa desgaste (GAHR, 1987).

De acordo com Briscoe & Adams (1987), o crucial para todos os mecanismos de desgaste, abrasivo ou outros, é conhecer o caminho, ou seja, a direção na qual o material se deforma sob a aspereza penetrante ou a partícula dura que entra em contato com o material.

Com o intuito de prever se uma deformação é elástica ou plástica, Fuisse et al. apud Halliday (1995), apud Briscoe & Adams (1995), mostrou que o máximo ângulo de uma aspereza, a qual se torna plástica, é dado por:

$$\tan \theta_{lim} = K(H/E)(1-\nu^2)$$

Onde:

“*H*” é o entalhe/recorte da dureza,

“*E*” é o módulo de Young,

“*ν*” é o coeficiente de Poisson

K=0,8, para a plasticidade parcial, ou 2 para a plasticidade cheia/inteira.

2.4.3.3.1 Sistemas Tribológicos Envolvidos em Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo pode ocorrer em baixo ou alto nível, dependendo da razão entre a dureza da partícula e da superfície. O desgaste abrasivo está relacionado a alguns mecanismos, dentre eles os principais são:

- ✚ Microcorte – Deformação plástica sem perda de matéria, gerando um sulco com conseqüente formação de acúmulos frontais e laterais da matéria movimentada.
- ✚ Microsulcamento – Formação de micro-cavacos sem deformação plástica lateral.
- ✚ Microlascamento – Formação de detritos, devido à formação e interação de fissuras. Este tipo de mecanismo acontece quando as tensões impostas superam as tensões críticas para a formação e propagação de trincas sendo restrita aos materiais frágeis.

São diversas as nomenclaturas utilizadas para estes mecanismos de desgaste, na literatura podem ser encontradas denominações tais como: microusinagem, riscagem, descamação, microtrincamento, microfadiga, que são tentativas de aproximar melhor o significado dos mecanismos que estão sendo observados nos experimentos (GAHR, 1987).

Microsulcamento e microcorte são mecanismos dominantes em materiais mais dúcteis. A ocorrência de um deles vai depender do ângulo de ataque das partículas abrasivas. O microcorte ocorre a partir de um ângulo de ataque crítico. Este ângulo de ataque crítico é função do material que está sendo desgastado e das condições de teste. A transição do mecanismo de microsulcamento para microcorte depende também do coeficiente de atrito. Normalmente, o mecanismo passa do microsulcamento para

microcorte com o aumento da dureza do material que está sendo desgastado. Aumentos ainda maiores de dureza resultam na passagem de microcorte para microtrincamento (GAHR, 1987).

O microtrincamento pode ocorrer quando são impostas grandes tensões sobre as partículas abrasivas, particularmente em superfícies de materiais frágeis. Neste caso, grande quantidade de detrito é retirada da superfície devido à formação e propagação de trinca.





Partículas de menor ou igual dureza que a superfície também podem desgastá-la. O ataque das partículas macias pode resultar em deformação elástica e plástica, fadiga de superfície, e a superfície ficar severamente danificada (GAHR, 1987).

2.5 - Variáveis que Podem Influenciar os Mecanismos de Desgaste Abrasivo

Segundo Mondal et al. (1998), a taxa de desgaste abrasivo e os mecanismos de desgaste podem ser influenciados por vários fatores como: o tamanho do grão abrasivo, a carga aplicada, a dureza dos materiais utilizados e a tenacidade da fratura.

Ainda de acordo com Souza (2002), uma grande variedade de parâmetros influencia os mecanismos de desgaste no geral, sendo que os principais são:

Parâmetros de Material:


-  Composição;
-  Tamanho do grão;
-  Módulo de elasticidade
-  Condutividade térmica;

 Dureza etc;

Parâmetros de Projetos:


 Forma;

 Carregamento;


 Tipo de movimento;


 Aspereza;

 Vibração;


 Número de ciclos etc.

Parâmetros de Meio Ambiente:


 Temperatura;

 Contaminação;

 Umidade;

 Atmosfera etc.

Parâmetros de Lubrificação:

 Tipo de lubrificante;

 Estabilidade de lubrificante;

 Tipo de fluido;

 Lubrificação etc.

Presença ou Ausência de Desgaste Interno

Segundo Catai et al., de acordo com pesquisadores relatados nos trabalhos de Mondal et al. (1998), embora se diga que a taxa de desgaste depende do tamanho do grão

abrasivo, existe um valor crítico de tamanho de grão abrasivo acima do qual a taxa de desgaste se torna independente do tamanho do grão. Também se ressalta que as diferenças nas durezas entre os dois corpos atritantes influenciam diretamente este tamanho crítico do grão abrasivo.

2.5.1 - Efeito da Dimensão do Grão Abrasivo

De acordo com Deuis (1996), o tamanho do grão abrasivo tem uma influência direta nos mecanismos associados ao desgaste, que pode ser caracterizado pela relação w/r , onde “ w ” é a espessura da ranhura e “ r ” o raio esférico do topo da partícula (grão). Dependendo desta relação, a partícula de grão abrasivo irá deformar plasticamente ou cortar a superfície. Como as partículas desgastadas tornam-se cegas ou o tamanho da partícula diminui, o mecanismo de desgaste exibe uma transição do corte para o desgaste de laminação.

Para ambos os tipos de desgaste abrasivo (dois ou três corpos), um tamanho crítico da partícula abrasiva pode ser observado. O desgaste volumétrico aumenta com o aumento do tamanho do grão abrasivo para esta dimensão crítica. Nesta dimensão crítica, tem-se a máxima ação abrasiva em termos do tamanho do desgaste produzido.

Sobre este valor crítico a taxa de desgaste é amplamente independente do tamanho do grão abrasivo. A forte diferença entre a dureza das partículas abrasivas e do material a ser desgastado influencia esta dimensão crítica do grão (DEUIS et al, 1996)

Para Deuis et al. (1996), a extensão da região tensionada plasticamente abaixo da superfície depende do tamanho do grão abrasivo e da carga aplicada. A profundidade global da deformação plástica foi relatada linearmente para a aplicação de carga e dimensões de grãos.

Salienta-se que no desgaste abrasivo de três corpos, a taxa de desgaste é menor que no desgaste abrasivo de dois corpos. Ainda segundo o tamanho do grão, Al Rubaie et al. (1999), afirmam que a eficiência na remoção do material depende da carga de contato elástico, a qual varia com o tamanho do grão, sendo que, no caso dos materiais contendo partículas reforçadas, a taxa de desgaste é influenciada pelo tamanho das partículas de reforço. A Figura 2.8 demonstra o quanto o tamanho do grão abrasivo é representativo no desgaste.

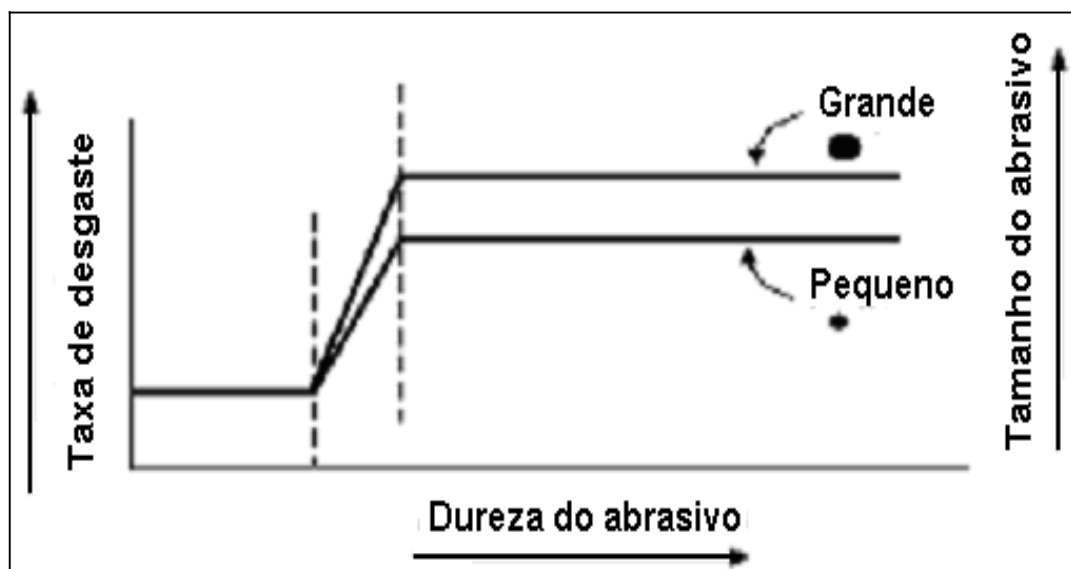


Figura 2.6 – Influência do tamanho do grão abrasivo na taxa de desgaste.

2.5.2 - Carga Aplicada

A carga a ser aplicada sobre os corpos em atrito durante o processo de desgaste abrasivo também é um dos fatores que influenciam fortemente as taxas de desgaste no material.

Mondal et al. (1998) propõem uma fórmula para quantificar a importância da carga aplicada no corpo de prova em relação ao tamanho do grão abrasivo em um desgaste abrasivo de dois corpos. Suas fórmulas permitem obter as taxas de desgaste abrasivo

teórico nos processos de abrasão. Foram desenvolvidas fórmulas por meio de regressões lineares tanto para ligas como para materiais compostos.

Segundo este mesmo autor, o efeito da carga na taxa de desgaste obtida tanto para os materiais compostos, como para as ligas é bem mais severo que o efeito do tamanho dos grãos abrasivos. Sendo que em relação aos materiais por estes testados (ligas e compósitos), o efeito da carga e do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste é relativamente maior no caso dos materiais compostos que nas ligas. Porém, existem algumas combinações de tamanhos de grãos com quantidade de cargas aplicadas que podem fazer com que a taxa de desgaste abrasivo seja maior nas ligas que nos materiais compostos.

Ainda de acordo com Mondal et al. (1998), a variação da carga aplicada tem muito mais influência na taxa de desgaste do material que a variação do tamanho do grão do abrasivo do disco. A taxa de desgaste na liga é muito maior que a taxa de desgaste obtida para os compostos, pois os mesmos possuem maior dureza devido ao óxido de alumínio que foi adicionado na matriz inicial que era uma liga de alumínio.

Gant & Gee (2001), também realizaram estudos sobre a influência da variação da carga aplicada sobre o corpo-de-prova num desgaste abrasivo de 3 corpos, para corpos-de-prova de ligas Cobalto-Carbeto de Tungstênio de elevada dureza e aços ultra-rápidos. Analisando-se comparativamente os resultados, estes concluíram que quanto maior era a carga aplicada no processo, ou seja, a carga que foi aplicada forçando o corpo-de-prova contra o disco; maiores foram os desgastes volumétricos dos corpos-de-prova. Desta forma, ficou evidente que quanto maior for a carga aplicada no processo, maiores serão os desgastes obtidos tanto para as peças (corpos-de-prova) como para as ferramentas (discos revestidos com carbeto de silício).

Em relação ao efeito da variação da carga e/ou do tamanho do grão abrasivo, é importante destacar ainda que um aumento geral na taxa de desgaste é observado com o aumento da carga para um tamanho particular de grão; isto é devido ao aumento geral da remoção de material com a carga. Quando a carga aplicada é menor, grãos mais grosseiros entram em contato diretamente com o corpo-de-prova, resultando em elevados desgastes. Para grãos mais finos, sob baixas cargas, há somente um riscamento; pois os menores grãos abrasivos estão em contato elástico com a superfície de teste e, então, suportam a carga aplicada sem contribuir para a remoção de material (DEGUPTA et al, 2001)

Numa análise geral tem-se que abrasivos com menores grãos abrasivos resultam em elevadas abrasões e maiores grãos abrasivos resultam em maiores microcortes. No “*microcutting*” maiores quantidades de materiais são perdidas. Em altas distâncias percorridas, a taxa de desgaste aumenta devido ao aparecimento de microfraturas (DEGUPTA et al, 2001).

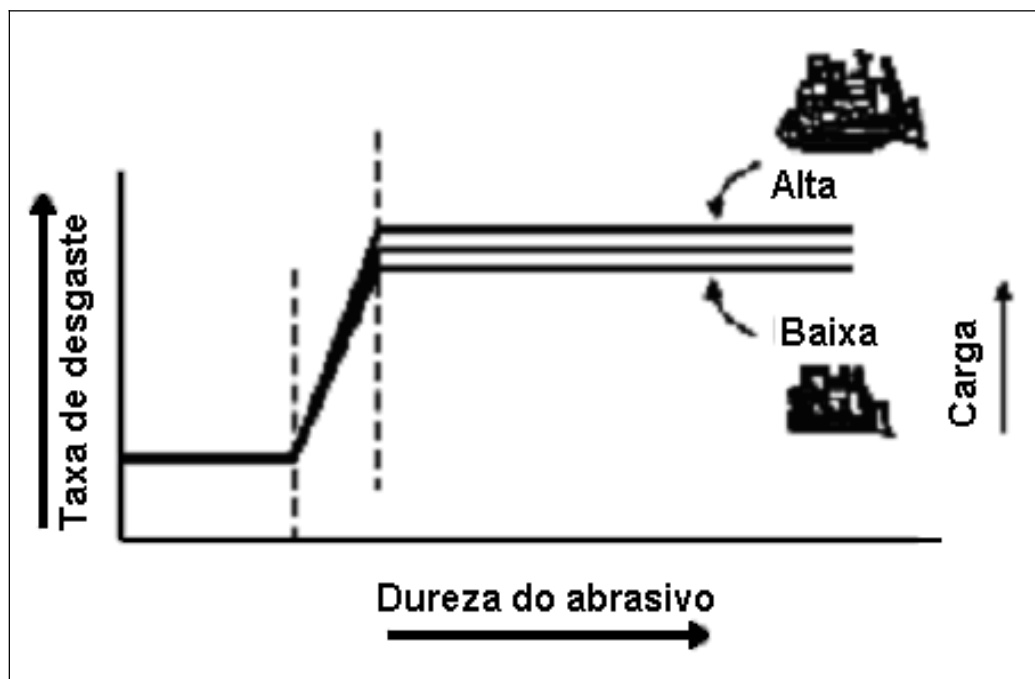


Figura 2.7 - Efeito da carga aplicada sobre o desgaste abrasivo

2.5.3 - Influência da Dureza

Deuis et al. (1996) enfatizaram o papel das partículas da segunda fase provendo áreas localizadas com altas tensões de concentração que influenciaram o fluxo de tensão e a taxa de desgaste. A maior resistência ao desgaste foi obtida em microestruturas finas, com partículas semi-coerentes dispersas. A influência dos carbeto na resistência ao desgaste depende de sua dureza em relação à dureza da matriz. Para materiais caracterizados de carbeto, dispersos em uma matriz macia, uma diminuição no caminho livre médio pela redução do tamanho do carbeto resulta em melhores resistências ao desgaste. Uma redução no tamanho do grão aumenta a dureza e também conduz ao aumento da resistência ao desgaste.

Hutchings (1992) descobriu que a dureza do grão abrasivo era 1, 2 vez maior que a da superfície desgastada. Então, o abrasivo médio riscaria a superfície. Deuis et al. (1996) também comentaram que a dureza do material determina a profundidade da indentação das partículas abrasivas, influenciando na profundidade relativa penetrada, onde, se esta for maior que a profundidade de indentação crítica para fratura, a taxa de desgaste é alta. A Figura 2.10 mostra o quanto à dureza do material abrasivo é significativo na análise do desgaste abrasivo.

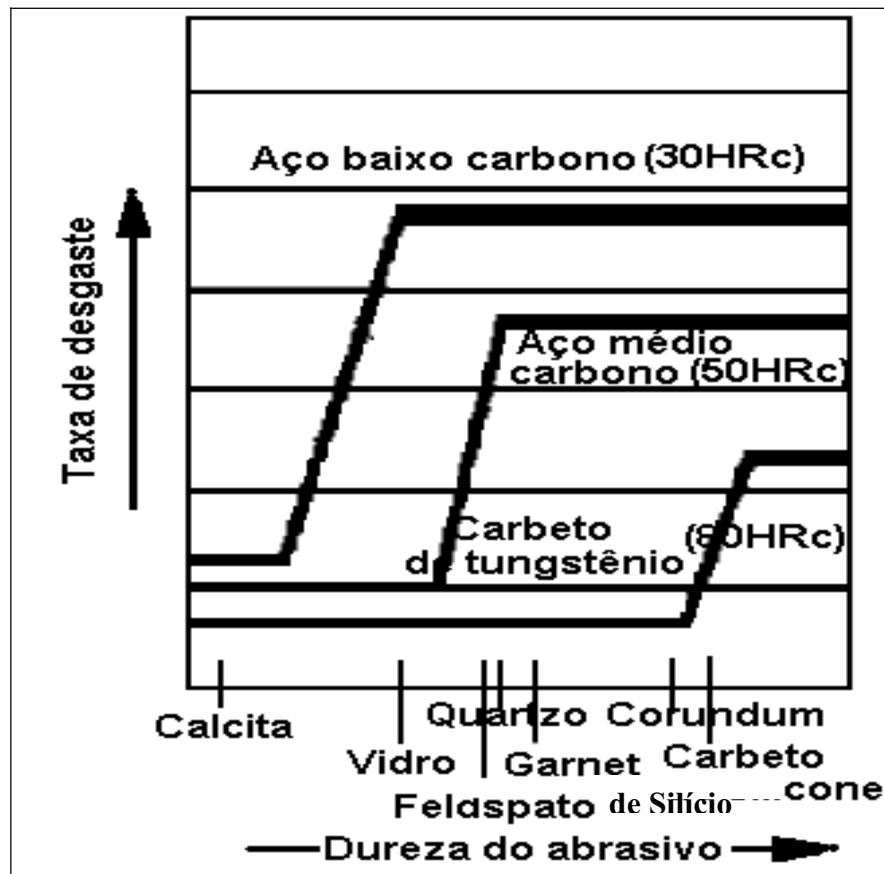


Figura 2.8 - Efeito da dureza do material abrasivo sobre o desgaste.

Ainda em relação à influência da dureza no desgaste abrasivo, Hawk et al. (1999) fizeram experimentos que comprovaram que há uma correlação direta entre a dureza dos materiais e o desgaste abrasivo. Em suas pesquisas, este provou claramente a influência da dureza do material na perda volumétrica do corpo de prova, mostrando que quanto maior a dureza do material utilizado, menor o desgaste abrasivo do corpo de prova em atrito.

2.5.4 - Influência da Temperatura

Segundo Wu et al. (1997), outro fator que afeta diretamente o processo de desgaste abrasivo de 2 ou 3 corpos é a temperatura. De acordo com Catai et al., por meio da análise dos resultados, Wu et al. verificaram que o desgaste abrasivo, ou seja, o volume desgastado do pino é maior quando o mesmo acontece na presença de maiores temperaturas, pois a

elevação da temperatura facilita o desencadear do mesmo, através, por exemplo, da redução da dureza dos materiais envolvidos. Ressalta-se que, nestes ensaios, o tempo de ensaio era sempre constante. A Figura 2.11 mostra o quando o efeito da temperatura incide sobre o processo de desgaste abrasivo.

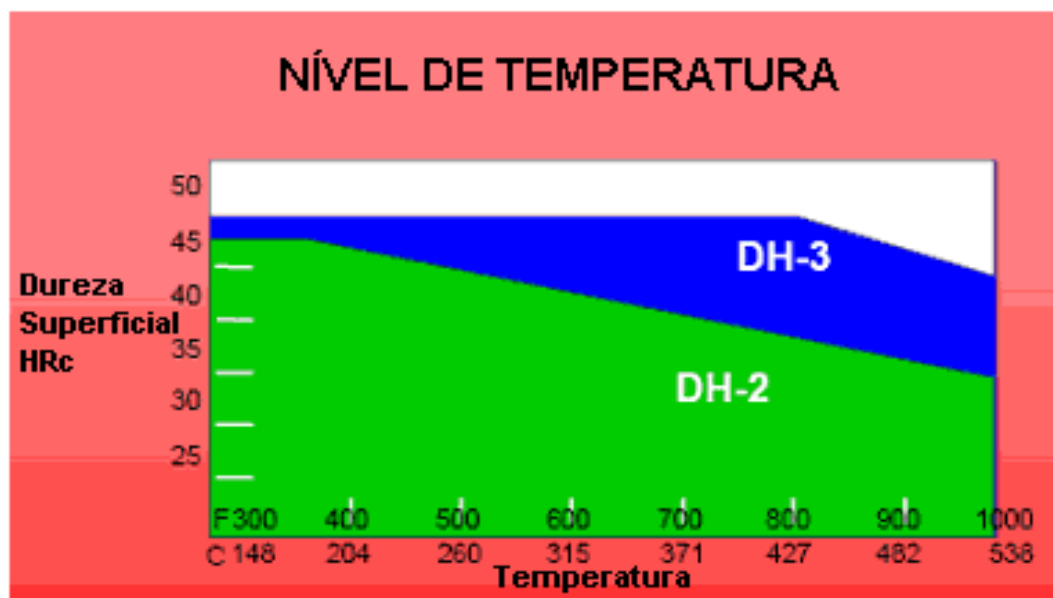


Figura 2.9 - Efeito da temperatura no desgaste abrasivo

2.6 - Propriedades Mecânicas do Metal que Influem no Desgaste

✚ Módulo de elasticidade – a resistência ao desgaste de metais puros aumenta diretamente com o módulo de elasticidade. Para os aços perlíticos, martensíticos ou revenidos, essa relação não é válida, porque o tratamento térmico não afeta o módulo de elasticidade.

✚ Dureza – o desgaste de metais puros é diretamente proporcional à sua dureza. Nas ligas, a proporcionalidade é válida até determinado valor da dureza do

material, a partir do qual a resistência ao desgaste cresce com menor intensidade, podendo até mesmo vir a diminuir após certo valor.

✚ Dureza superficial – na superfície desgastada existe um grau de encruamento e, conseqüentemente, um aumento da dureza no local. A resistência à abrasão pode ser considerada como proporcional a essa dureza, chamada de dureza máxima.

✚ Propriedades de escoamento – análises de tensão/deformação mostraram que, para metais puros, também vale a relação.

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^\alpha$$

Onde:

σ = tensão de escoamento;

A = constante;

ε = deformação verdadeira;

α = coeficiente de encruamento.

Estudos mostram que a resistência à abrasão é proporcional à dureza e varia exponencialmente com a tenacidade. De acordo com Batista e Nascimento (www.spectru.com.br), como o desgaste é um fenômeno essencialmente superficial, envolvendo a remoção mecânica indesejável de material de superfícies,

“As soluções encontradas através de solda de revestimento, aspersão térmica tipo High Velocity Oxi Fuel - HVOF, nitretação e de outras técnicas originalmente utilizadas,

têm se mostrado altamente valiosas tanto para prevenir como para minimizar e reparar as diferentes estruturas danificadas pelos mais diversos tipos de desgaste. Em inúmeras situações, peças e componentes podem ser fabricados com materiais convencionais, dentro das especificações normais do projeto. Posteriormente, pode-se aplicar sobre a superfície, camadas ou cordões de solda, com consumíveis adequados, deposição de ligas metálicas de composição e constituição ideal ao favorecimento de superfícies endurecidas e resistentes a este desgaste. A resistência ao desgaste é considerada como parte de um sistema tribológico sendo muitos os parâmetros que acabam por influir na taxa de desgaste, incluindo as características de projetos, condições de operação, tipo de abrasivo e propriedades do material. Nas propriedades dos materiais, as características microestruturais têm particular importância, tanto nas propriedades mecânicas, quanto nas taxas de desgaste. Disponibilizado no site www.spectru.com.br, consultado em 23 de abril de 2007”.

BATISTA e NASCIMENTO apud Murray (www.spectru.com.br), destacou o seguinte sobre desgaste abrasivo:

“A resistência ao desgaste de aços tratados termicamente para vários níveis de dureza e também de alguns metais puros. Para metais puros, a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a dureza. Nos materiais ferrosos, esta relação (resistência ao

desgaste versus dureza) não é simples. O aumento no teor de carbono faz a resistência ao desgaste aumentar. Para os aços com a mesma porcentagem de carbono, a resistência ao desgaste de aço ligado é maior que de um aço sem liga, mas este aumento é pequeno quando comparado com outro em que aumentou a porcentagem de carbono. A resistência ao desgaste geralmente aumenta conforme a microestrutura é mudada de ferrita para perlita, desta para bainita e finalmente para martensita; isto, desde que seja acompanhada de aumento de dureza. Entretanto, para um mesmo valor de dureza, a estrutura bainítica tem maior resistência ao desgaste que a martensítica. A microestrutura tem maior influência no desgaste que a dureza da matriz. Tem sido mostrado que a presença de austenita retida tem melhorado a resistência ao desgaste da martensita revenida. A austenita fornece uma melhor ancoragem aos carbeto, ocasionando um baixo arrancamento do carbeto da matriz austenítica. Os carbeto parecem ser particularmente importantes na resistência à abrasão, principalmente em materiais como os aços e ferros fundidos brancos ligados ao cromo. A influência desses está relacionada com sua dureza, tamanho e distribuição. Carbeto duros, e finamente dispersos, aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que os grosseiros diminuem. Estruturas deformadas por trabalho a frio, não alteram a resistência ao desgaste, enquanto que o aumento da dureza pelo refinamento dos grãos agiria favoravelmente. Existem ainda muitos outros fatores que

influenciam a taxa de desgaste, como o tamanho da partícula abrasiva e o coeficiente de atrito. Estes trabalhos têm demonstrado que o estudo dos fenômenos de desgaste é bastante complexo. Na especificação e normalização de ligas para resistir ao desgaste, as maiores dificuldades residem na inexistência de ensaios padronizados, para discriminar os níveis de aceitação ou rejeição, conforme as aplicações particulares. Estas dificuldades estão associadas principalmente à natureza complexa do fenômeno do desgaste. Este além de envolver a deformação e corte superficial por partículas abrasivas, ou o atrito entre superfícies metálicas, muitas vezes ocorre devido a vários mecanismos concomitantes de desgaste da superfície, os quais também podem estar associados a outros fenômenos de degradação tais como impacto, corrosão, fluência ou fadiga”.

2.7 - Estrutura Metalúrgica – Influência do Desgaste

De acordo com Batista e Nascimento (www.spectru.com.br), o teor de carbono aumenta a resistência ao desgaste dos aços perlíticos com o aumento do endurecimento. Os carbetos aumentam a resistência ao desgaste com o aumento na quantidade, distribuição uniforme e forma adequada. Não são adequados, porém, quando existe o choque associado ao desgaste por abrasão.

A martensita não-revenida ou revenida abaixo de 230°C é a fase que melhor resiste ao desgaste na temperatura ambiente. Se o revenido for acima de 350°C, a perlita apresenta

um resultado melhor para a mesma dureza (50 HB). A fase bainítica da mesma dureza e composição química resiste melhor ao desgaste que uma estrutura martensítica nas mesmas condições.

A perlita aumenta a resistência à abrasão com o aumento das colônias de perlita e com a fração volumétrica de cementita. Para a mesma dureza, a perlita lamelar resiste melhor que a esferoidizada. A resistência ao desgaste da ferrita aumenta com o aumento dos carbeto dispersos na matriz. Um aço austenítico, com a mesma fração de carbeto que um ferrítico, resiste melhor ao desgaste.

2.8 - Revestimentos Superficiais

De acordo com Lima et al (2001), uma das mais eficientes e econômicas formas de se adequar peças e componentes de equipamentos industriais a uma aplicação específica tem sido, há longo tempo, a aplicação de revestimentos. Estes vêm ganhando evidência, ano após ano, em aplicações contra desgaste, corrosões, dentre outras formas de consumo de massa.

Ainda de acordo com Lima et al. (2001), apud Tucker et al., o uso de revestimentos duros para melhorar a resistência ao desgaste de componentes mecânicos têm sido comum há várias décadas, com variadas técnicas de aplicação, que incluem soldagem, cladding, eletrodeposição, PVD (deposição física de vapor), CVD (deposição química de vapor), sendo a aspersão térmica a técnica que mais tem se desenvolvido nos últimos tempos, apresentando-se como alternativa viável, em relação aos demais processos comumente utilizados.

2.8.1 - Aspersão Térmica

A aspersão térmica consiste de um grupo de processos nos quais partículas finamente divididas de materiais para revestimentos, metálicos ou não- metálicos, são depositadas sobre um substrato devidamente preparado, na condição fundida ou semi-fundida, para formar uma camada superficial, como mostra a Figura 2.12.

O calor necessário para a operação é gerado na tocha de aspersão e pode vir da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico. As partículas aquecidas são aceleradas por um gás comprimido, confinadas num feixe, e dirigidas ao substrato. Ao se chocarem, as partículas se achatam e formam finas lentes, que se conformam e aderem às irregularidades superficiais e entre si. Com a continuidade do processo, as partículas se resfriam, formando um revestimento com estrutura lamelar (MARQUES, www.infosolda.com.br).

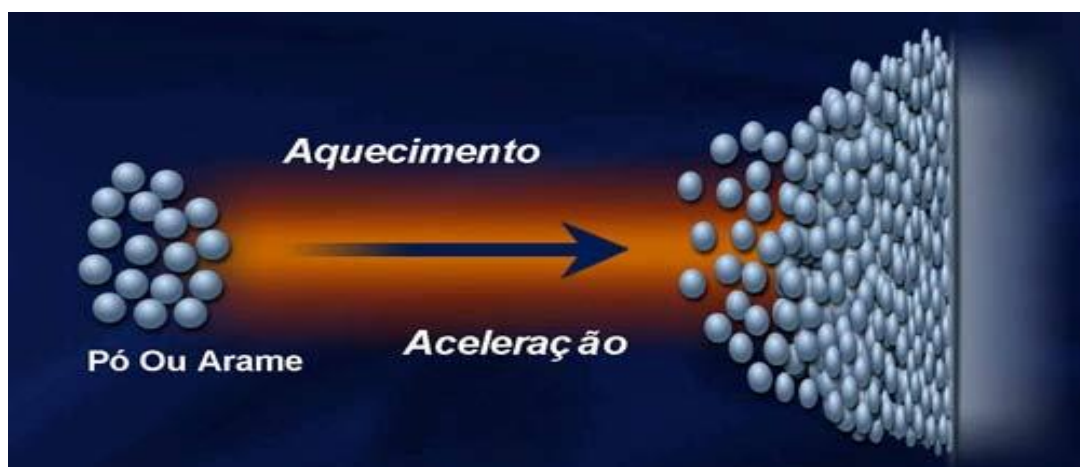


Figura 2.10 – Esquema sobre a deposição das partículas sobre o substrato.

As variações básicas nos processos de aspersão térmica se referem ao material a ser aplicado, ao método de aquecimento e ao método de aceleração das partículas em direção ao substrato. Os materiais podem ser fornecidos na forma de vareta, arame, cordão (tubo

de plástico contínuo) e pó. Metais, óxidos, compostos intermetálicos, *cermets*, plásticos orgânicos e alguns vidros podem ser depositados por uma ou mais variações de processos (MARQUES, www.infosolda.com.br).

Os processos de aspersão térmica podem ser classificados em dois grupos básicos, dependendo da fonte de calor usada, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Processos de aspersão térmica

Combustão	Elétrico
Chama	Plasma
Detonação	Arco

O sucesso no uso de revestimentos aspergidos termicamente depende basicamente de sua aplicação cuidadosa, segundo procedimentos bem estabelecidos. Qualquer desvio destes procedimentos leva, em geral, a resultados não confiáveis. Os revestimentos termicamente aspergidos apresentam três aspectos básicos: o substrato, a adesão do revestimento e a estrutura deste (MARQUES, www.infosolda.com.br).

Os substratos sobre os quais os revestimentos termicamente aspergidos podem ser aplicados incluem metais, óxidos, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeira, sendo que algumas técnicas especiais podem ser necessárias. Nem todos os materiais para aspersão podem ser aplicados a qualquer tipo de substrato. Uma preparação adequada deste é necessária antes da aspersão propriamente dita, independente do processo a ser usado. Essa preparação é essencialmente a mesma para cada processo a ser usado e consiste de duas etapas básicas: limpeza da superfície para eliminar contaminantes e obtenção de rugosidades para aumentar a área superficial efetiva e melhorar a adesão (MARQUES, www.infosolda.com.br).

A ligação ou adesão entre revestimento e substrato pode ser mecânica, química e/ou metalúrgica e é influenciada por diversos fatores, tais como: material do revestimento, condição do substrato, rugosidade, limpeza e temperatura da superfície a ser revestida, antes e durante o processo e velocidade de impacto das partículas (MARQUES, www.infosolda.com.br).

A estrutura e a química do depósito aspergido em ar é diferente do material no estado original. Estas diferenças são devidas à natureza progressiva do revestimento, à reação com gases durante o processo e a atmosfera em contato com o material enquanto líquido. Por exemplo, quando ar ou oxigênio são usados, óxidos podem ser formados e se incorporarem ao revestimento. Revestimentos metálicos tendem a ser porosos e frágeis, com uma dureza diferente do material original. A estrutura de revestimentos na condição como aspergidos é similar quanto à natureza lamelar, mas pode exibir diferentes características em função do processo, dos parâmetros, da técnica e do material usado, como mostra a Figura 2.13. A densidade do depósito varia com a temperatura da fonte de calor usada e com a velocidade das partículas no impacto, como mostra a Tabela 2.2 e a Figura 2.14 (MARQUES, www.infosolda.com.br).

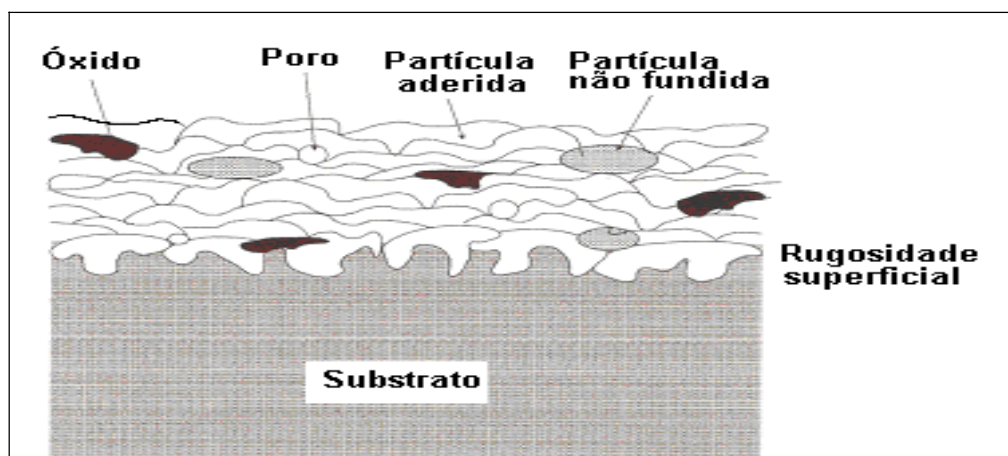


Figura 2.11 - Esquema de uma seção de um revestimento aspergido

A aplicação final determina as propriedades necessárias para o revestimento e o tipo de combustível e equipamentos necessários. Revestimentos termicamente aspergidos têm sido usados intensamente na fabricação de componentes nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia e, particularmente, na aeroespacial. Em manutenção, milhões de dólares têm sido economizados com o uso da aspersão térmica. Tal técnica tem sido usada tanto em oficina como no campo, no revestimento de estruturas e partes de equipamentos, com economia de tempo e de recursos (MARQUES, www.infosolda.co.br).

Tabela 2.2 – Temperatura das fontes de calor

Fonte	Temperatura °C
Propano + oxigênio	2640
Gás natural + oxigênio	2735
Hidrogênio + oxigênio	2690
Acetileno + oxigênio	3100
Arco elétrico	2200 – 8300

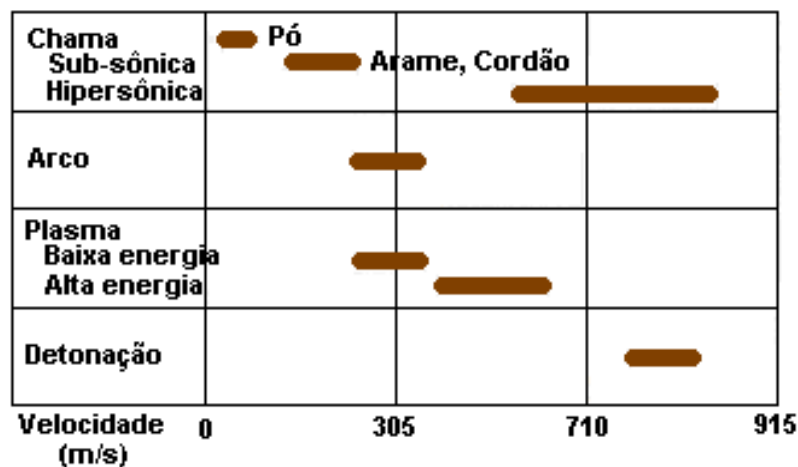


Figura 2.12 Velocidade de impacto média das partículas

2.8.1.1 - Processos

2.8.1.1.1 - Processos por Combustão

Este grupo de processos utiliza o calor gerado pela queima de um gás combustível. Qualquer substância que se funda e não sublima a temperaturas inferiores a 2.760°C pode ser aspergida por este processo como mostram as Figuras 2.15 e 2.16. Os materiais aplicados podem ser metais e ligas na forma de arame, cordão ou pó e cerâmicos, na forma de vareta, cordão ou pó (MARQUES, www.infosolda.com.br).

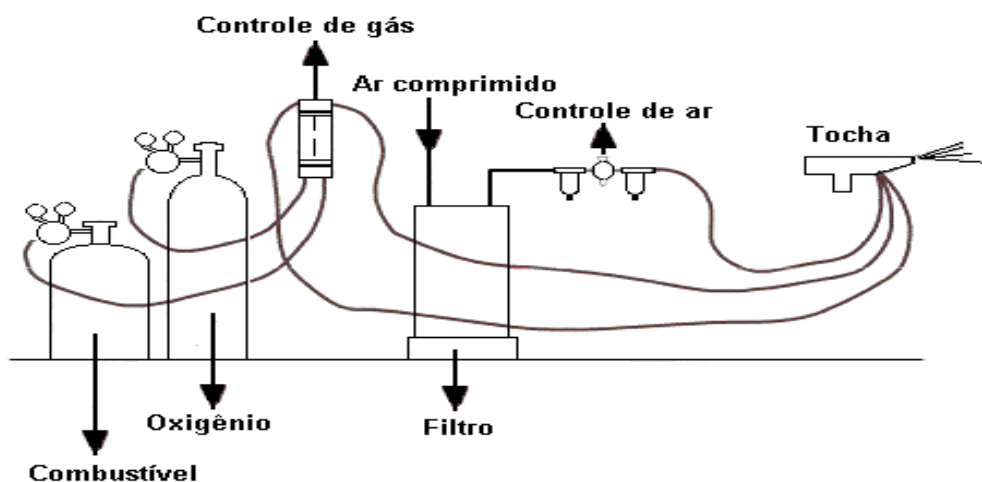


Figura 2.13 - Esquemática de um equipamento típico para aspersão térmica por combustão

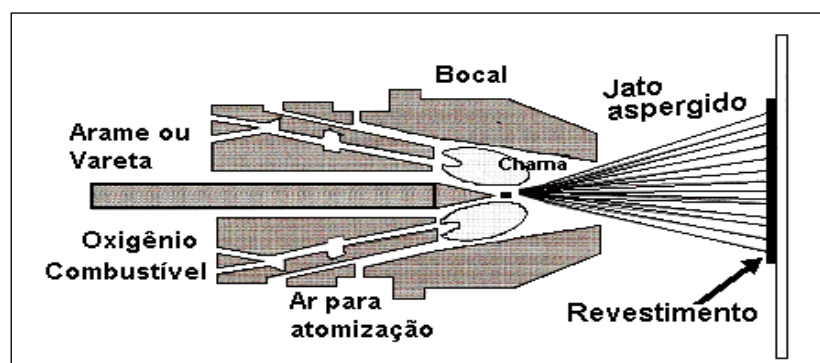


Figura 2.14 - Esquemática de uma tocha para aspersão por chama

2.8.1.1.1.1 - Arames e Varetas

O equipamento usado para aplicação de arames e varetas é similar, como mostrado na figura. A seção transversal típica de uma tocha de aspersão com estes processos é mostrada na Figura 2.16.

O material a ser aspergido é inserido por roletes alimentadores na parte posterior da tocha. Estes podem ser tracionados por um motor elétrico ou pneumático, ou por uma turbina a ar. O material é alimentado por meio de um bocal, onde é fundido por uma chama de gás combustível, concêntrica a este.

Os gases combustíveis usados juntamente com o oxigênio foram mostrados na Tabela 2.2. O acetileno é o mais largamente usado por sua maior temperatura de chama. Entretanto, em certos casos, temperaturas mais baixas são usadas com vantagens econômicas. A chama é usada apenas para fundir o material. Para se obter aspersão, um jato de gás, em geral ar comprimido, é usado para pulverizar o material e acelerar as partículas em direção ao substrato. Em aplicações especiais, um gás inerte pode ser usado. Os roletes de alimentação devem ser escolhidos e apropriados à forma do material a ser alimentado, isto é, se arame, vareta ou cordão (MARQUES, www.infosolda.com.br).

2.8.1.1.1.2 - Pó

Tochas para aspersão à chama com pó são mais leves e mais compactas que tochas para outros processos, como mostra a Figura 2.17. Devido às menores temperaturas e velocidades alcançadas pelas partículas, os revestimentos obtidos têm, em geral, menor resistência adesiva ao substrato, menor resistência coesiva entre as lamelas e maior porosidade, quando comparados com os depositados por outros processos de aspersão térmica.

O material a ser aspergido pode ser um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto, um cerâmico, um *cermet* ou combinação destes. O processo é geralmente usado para aplicação de ligas metálicas autofluxadas, que devem ser fundidas após a aspersão. Estes materiais contêm boro e silício que servem como agentes fluxantes e minimizam a oxidação. Sua fusão e/ou ligação metalúrgica a um substrato metálico é(são) obtida(s) aquecendo-se o revestimento até sua temperatura de fusão, que, em geral, é inferior a 1040°C e pode ser feita com o uso de qualquer fonte de calor, como uma chama, uma bobina de indução ou um forno. Um arco elétrico também pode ser usado, mas com certo cuidado, para evitar ou minimizar a fusão do substrato.

O pó para aspersão é armazenado num recipiente que pode ser parte integrante da tocha ou ser acoplado a ela. Uma pequena quantidade de gás é desviada para arrastar o pó até o jato da mistura oxigênio/combustível em chama, quando é fundido e acelerado em relação ao substrato. Um corte transversal de uma tocha típica para aspersão de pó por chama é mostrado na Figura 2.17.

Variações do processo de aspersão térmica de pó à chama incluem: gás comprimido para alimentação do pó na chama, jatos adicionais de ar comprimido para acelerar as partículas fundidas, alimentador de pó remoto, com arraste do pó para a tocha por um tubo pressurizado com gás inerte e dispositivos para aceleração a alta velocidade à pressão atmosférica. Esses refinamentos tendem a aumentar a taxa de alimentação de pó e, às vezes, a velocidade das partículas fundidas, que aumentam a resistência adesiva e a densidade do revestimento aspergido.

Revestimentos fundidos pós-aspersão são densos e relativamente isentos de porosidade. A composição da liga pode levar a revestimentos com níveis de dureza Rockwell C superiores a 50. A espessura destes revestimentos é limitada àquelas faixas

que podem ser aquecidas até a temperatura de fusão sem descamação. O uso de ligas autofluxantes é limitado a aplicações em que os efeitos da fusão e distorção podem ser tolerados. Revestimentos mais espessos de metais dissimilares podem ser aplicados em passes múltiplos. A superfície que vai receber o segundo revestimento deve ser limpa de todos os resíduos de óxido após cada etapa de fusão.

Em todos os processos de aspersão térmica, a taxa de alimentação de pó afeta a estrutura e a eficiência de deposição do revestimento. Se o material não é aquecido adequadamente, a eficiência de deposição cai rapidamente e o revestimento conterá partículas não fundidas retidas. Se a taxa de alimentação de pó for muito baixa, uma certa quantidade de pó pode se volatilizar, resultando em deterioração do revestimento e elevação dos custos. Os alimentadores de pó são compostos por um recipiente e um sistema de medição que regula a taxa de alimentação de material no dispositivo transportador por gás (MARQUES, www.infosolda.com.br).

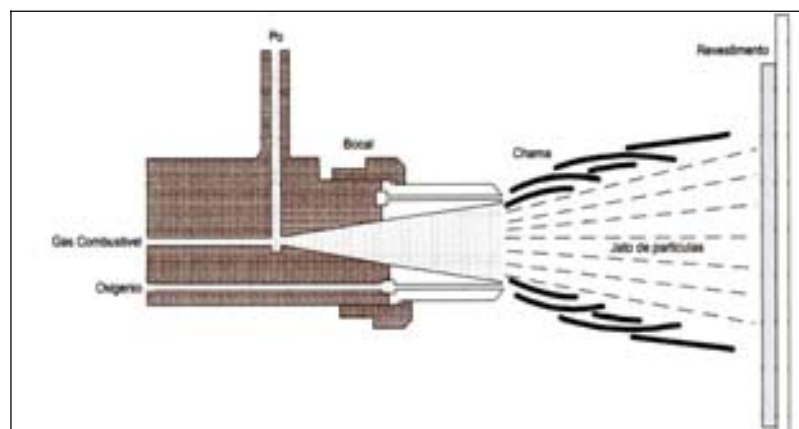


Figura 2.15 - Esquemática de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama

2.8.1.1.2 - Detonação

A tocha de detonação é diferente de outros equipamentos de aspersão por combustão. Ela utiliza a energia de explosões de uma mistura oxigênio-acetileno, em vez de uma chama estacionária, para impulsionar o pó até a superfície do substrato. O depósito resultante é extremamente duro, denso, fortemente ligado ao substrato.

Uma tocha de detonação, mostrada na Figura 2.18, consiste basicamente de um tubo comprido, no qual é introduzida uma mistura de gás combustível, oxigênio e pó. Quando é feita a ignição da mistura, uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é de 760 m/s aproximadamente. Após cada injeção de mistura, uma certa quantidade de nitrogênio é introduzida no tubo para purga deste. Ocorrem várias detonações por segundo, gerando um ruído da ordem de 150 dB, sendo muitas vezes utilizadas instalações especiais com isolamento acústico para estas operações.

Dentro do tubo, temperaturas superiores a 3300°C são atingidas, enquanto a temperatura do substrato deve ser mantida abaixo dos 150°C, usando-se dispositivos de resfriamento, se for o caso.

A espessura dos revestimentos, geralmente, situa-se entre 0,05 e 0,5mm. A operação é, normalmente, mecanizada e às vezes remotamente controlada. Excelente acabamento pode ser obtido, devido à baixa porosidade do revestimento (MARQUES, www.infosolda.com.br).

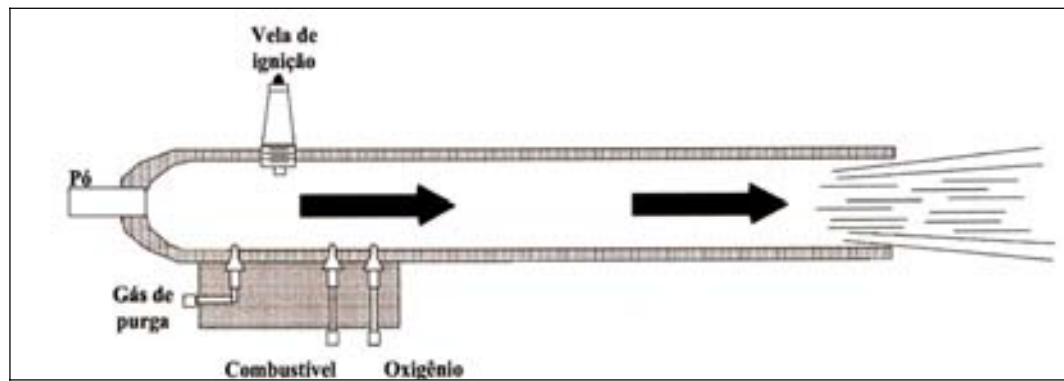


Figura 2.16 - Esquemática de Tocha de detonação

2.8.1.1.3 - Processos Elétricos

2.8.1.1.3.1 - Arco Elétrico

No processo de aspersão a arco elétrico, dois arames eletrodos consumíveis são alimentados de forma a se encontrar em um ponto à frente de um jato de gás, que serve para atomização. Uma diferença de potencial de 18 a 40V é estabelecida entre os arames, produzindo um arco elétrico que funde a ponta destes. O jato de gás atomizante (em geral ar comprimido) destaca o material fundido, produzindo um jato de gotículas fundidas que é dirigido ao substrato. A Figura 2.19 mostra um desenho esquemático de uma tocha para aspersão a arco.

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

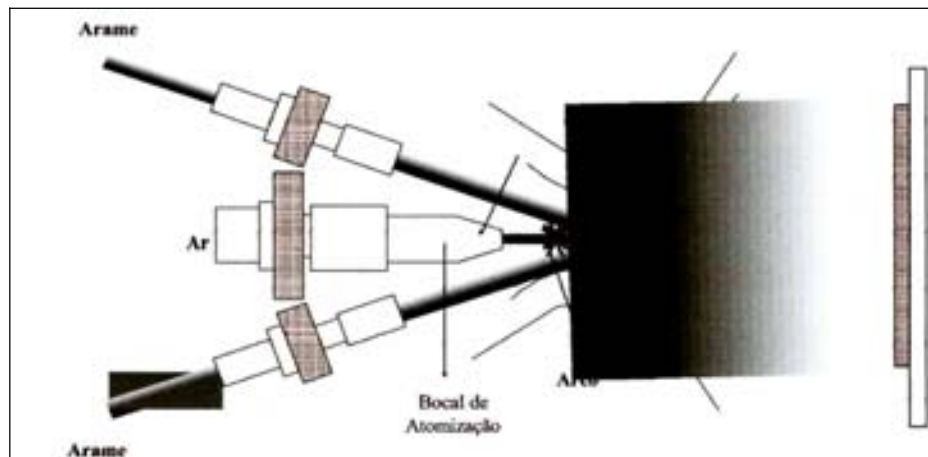


Figura 2.17 - Esquemática de tocha para aspersão a arco elétrico

A temperatura do arco é consideravelmente maior que o ponto de fusão do material aspergido, de modo que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir zonas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. Estas interações são similares a pequenas soldas a ponto e conferem excelente resistência de adesão e coesão ao revestimento. Este processo apresenta taxas de deposição mais altas que outros processos de aspersão. Os fatores que influenciam esta taxa são a corrente e a velocidade de alimentação de arame, que dependem do equipamento usado.

O comprimento do arco e o tamanho das gotículas tendem a aumentar com a elevação da diferença de potencial entre os arames. Esta deve ser mantida em valores mínimos, compatíveis com a estabilidade do arco, para se obter revestimentos densos e de melhor acabamento (MARQUES, www.infosolda.com.br).

2.8.1.1.3.2 - Arco Plasma não Transferido

O desenvolvimento de turbinas e motores de foguetes tem exigido bom desempenho de materiais de engenharia em condições cada vez mais severas. Para

satisfazer estas exigências, óxidos e carbonetos têm sido considerados, devendo ser aplicados por processos de aspersão térmica de alta temperatura. O processo plasma tem atendido esta necessidade e levou ao desenvolvimento de uma nova família de materiais e técnicas de aplicação para uma ampla faixa de aplicações industriais.

Na aspersão a plasma, Figura 2.20, o material é aplicado a partir de um pó. Aplicação a partir de arames tem sido desenvolvida mais recentemente. Neste processo, um gás ou mistura de gases passa através de um arco elétrico estabelecido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre, dotado de um orifício, alinhados coaxialmente. Em sua passagem, o gás é aquecido, gerando o plasma.

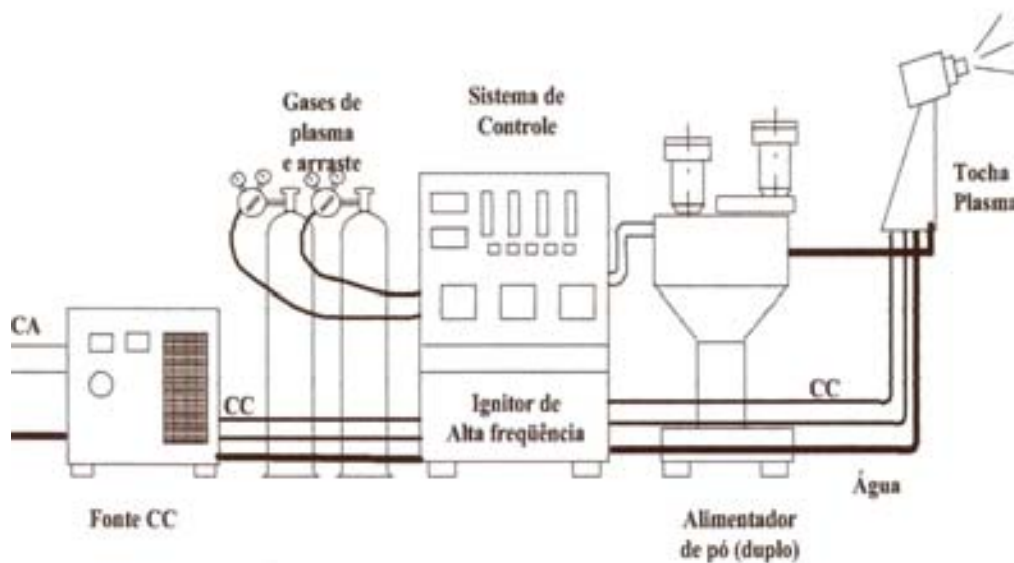


Figura 2.18 - Esquemática de sistema de aspersão térmica a plasma

O pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado em direção ao substrato por um jato de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, intensidade da corrente elétrica, composição e vazão do gás de plasma. Em geral, nitrogênio ou argônio são usados como gás de plasma, podendo conter adições de hidrogênio ou hélio para aumentar sua potência e velocidade.

O equipamento básico para a aspersão a plasma, mostrado na figura 2.20, consiste de uma fonte de corrente contínua constante, alimentador de pó, fonte de gás e um sistema de controle, que permite ajustar os parâmetros de operação (corrente, vazões de gás, fluxo de água para refrigeração) e faz a sincronia de todo o sistema.

2.8.1.1.3.3 - Arco Plasma Transferido

Neste caso, o processo é uma combinação de aspersão térmica e soldagem. O substrato deve ser condutor e faz parte do circuito do arco elétrico que gera o plasma. O material aspergido se mistura com o material da poça de fusão formada no substrato, isto é, ocorre diluição. O equipamento usado é similar ao necessário para o plasma não transferido, com exceção da tocha.

A ligação do revestimento ao substrato é essencialmente metalúrgica e as espessuras utilizadas são, em geral, maiores que em outros processos de aspersão térmica. O depósito é denso, uniforme e com bom acabamento. A operação é geralmente mecanizada e com boa reprodutibilidade. Entretanto, a combinação de substratos e materiais aplicáveis é mais limitada.

2.8.1.2 Preparação da Superfície








A preparação da superfície é a etapa mais crítica da operação de aspersão térmica. A qualidade da adesão do revestimento está diretamente relacionada com a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato. A obediência rigorosa a procedimentos padronizados de preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso da aplicação de revestimentos por aspersão térmica. O tipo de material do revestimento e do substrato são os fatores principais na determinação do processo e qualidade da preparação necessária da superfície para se obter adesão suficiente a uma dada aplicação.

Em partes sujeitas a fortes tensões mecânicas, uma inspeção prévia à operação de revestimento é necessária, para a detecção de falhas no metal base, que é feita normalmente por meio de ensaios não-destrutivos. Falhas estruturais no metal base induzirão falhas similares no revestimento. Trincas no substrato não podem ser reparadas por aspersão térmica e revestimentos depositados por esta técnica não adicionam resistência mecânica ao substrato (MARQUES, www.infosolda.com.br).

2.8.1.3 - Limpeza e Manuseio

O primeiro passo na preparação de um substrato para aspersão térmica é a retirada de todos os contaminantes superficiais, tais como poeira, óleo, graxa e pintura. O calor do processo de aspersão não remove contaminação e esta inibe a adesão do revestimento. Depois que todos os contaminantes forem eliminados, a limpeza deve ser mantida até que o ciclo de revestimento se complete. As peças devem ser protegidas de partículas transportadas pelo ar e marcas de dedos, bem como ser manuseadas com ferramentas e material limpo (MARQUES, www.infosolda.com.br).

2.8.1.3.1 - Métodos de Remoção de Contaminantes:

-  Desengraxe com vapor
-  Jateamento úmido
-  Decapagem ácida
-  Aquecimento ao forno
-  Limpeza ultrassônica
-  Jateamento seco
-  Escovamento

2.8.1.4 - Criação de Rugosidade

Após a limpeza, vários métodos são usados para produzir uma superfície mais adequada para a aderência do revestimento. Os principais são: jateamento abrasivo, macroenrugamento e aplicação de revestimento de ligação. Combinações destes métodos são também empregados, incluindo jateamento abrasivo com subsequente aplicação de um revestimento de ligação e usinagem seguida de jateamento abrasivo.

A obtenção de uma rugosidade adequada é tão importante quanto a limpeza. Durante a aspensão, as partículas fundidas ou semi-fundidas formam bolachas quando se chocam com a superfície do substrato. Estas, à medida que se resfriam e se contraem, precisam aderir a uma superfície que favoreça o ancoramento mecânico.

A geração de uma superfície rugosa é usada para aumentar a aderência e a coesão entre as partículas do revestimento por: geração de tensões superficiais de contração, intertravamento de camadas, aumento da área de interação e descontaminação da superfície.

O grau de enrugamento necessário para produzir um revestimento resistente e adequado depende do material aplicado, do processo e das condições de serviço da peça final (MARQUES, www.infosolda.com.br).

2.8.2 - Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste

A principal característica deste tipo de revestimento que são aplicados para resistir ao desgaste é a sua elevada dureza.

2.8.2.1 - Recobrimento Duro

De acordo com Batista e Nascimento (www.spectru.com.br), recobrimento duro é o nome dado ao processo que consiste em produzir por soldagem uma camada dura e resistente ao desgaste na superfície da peça sujeita ao desgaste.

2.8.2.2 - Classificação dos Materiais para Recobrimento Duro

De acordo com Batista & Nascimento apud o Metals Handbook (www.spectru.com.br), os materiais para recobrimento duro são classificados em cinco grandes grupos, em função do teor total de elementos de liga. Em geral, a resistência ao desgaste e o custo crescem com o número do grupo. A escolha de uma liga específica dependerá da aplicação e do tipo de soldagem utilizado, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Ligas e principais elementos de liga para revestimento duro

Teor total de elementos de liga %	Elementos de liga principais
Materiais ferrosos de baixa liga	
1A 2 a 6	Cr, Mo, Mn
1B 6 a 12	Cr, Mo, Mn
Materiais ferrosos de alta liga	
2A 12 a 15	Cr, Mo
2B 12 a 25	Mo, Cr
2C 12 a 25	Mn, Ni
2D 30 a 37	Mn, Cr, Ni
3A 25 a 50	Cr, Ni, Mo
3B 25 a 50	Cr, Mo
3C 25 a 50	Co, Cr

Ligas à base de níquel e à base de cobalto	
4A 50 a 100	Co, Cr, W
4B 50 a 100	Ni, Cr, Mo
4C 50 a 100	Cr, Ni, Mo
Carbetos	
5 75 a 96	WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica

As ligas do grupo 1A são aços de baixo teor de liga, quase sempre tendo cromo com principal elemento de liga. O teor total dos elementos de liga, incluindo o carbono, fica entre 2% e 6%. Estas ligas de teor são empregadas freqüentemente como uma camada de base para um recobrimento duro com ligas de teor de liga mais elevado.

As ligas ferrosas do subgrupo 1B são semelhantes às do grupo 1A, porém com maior teor de elementos de liga (6% a 12%) e com teor de carbono até 2% ou mais. Muitos aços - ferramenta e alguns ligados fazem parte deste grupo.

Os materiais do grupo 1 apresentam maior tenacidade entre as ligas de recobrimento duro, excetuando-se os aços-manganês austeníticos. Possuem também melhor resistência ao desgaste que os aços de baixo e médio carbono, que são ligas usualmente recobertas pelo grupo 1. O custo é mais barato que as outras ligas de recobrimento duro e muito empregados nos casos em que se necessita da usinabilidade e de apenas um aumento moderado da resistência ao desgaste.

As ligas do subgrupo 2A são ligas em que o principal elemento de liga é o cromo, com teor total de elemento de liga entre 12% e 25%. Algumas delas têm certo teor de molibdênio. Este grupo inclui ainda alguns não-ferros fundidos de médio teor em liga. O molibdênio é o principal elemento de liga em quase todos os materiais do grupo 2B, que contam também com teores relativamente altos de cromo.

O subgrupo 2C é constituído pelos aços-manganês austeníticos. Manganês é o principal elemento de liga, estando também presente o níquel, para maior estabilização da austenita.

As ligas dos subgrupos 2A e 2B são mais resistentes ao desgaste, menos tenazes e mais caras que os materiais do grupo 1. Já os subgrupos 2C e 2D são muito tenazes, porém apresentam limitada resistência ao desgaste, que pode aumentar muito com o encruamento. As ligas do subgrupo 2D possuem um teor total de elementos de liga entre 30% e 37%, variando o carbono entre 0,10% e 1%.

Os materiais do grupo 3 apresentam 25% a 50% de elementos de liga. São ligas com alto cromo, várias delas com níquel e/ou molibdênio. Os teores de carbono variam entre 1,75% a 5%. Este grupo é caracterizado pela presença maciça de carbonetos hipereutéticos, que conferem às ligas uma alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor. São ligas mais caras que as dos grupos 1 e 2.

O grupo 4 compreende as ligas à base de cobalto e à base de níquel com teor total de elementos não-ferrosos entre 50% e 99%. As ligas à base de cobalto, do subgrupo 4^a, são consideradas como os mais versáteis materiais de recobrimento duro. Resistem ao calor, à abrasão, à corrosão, ao impacto, à descamação, à oxidação, ao choque térmico, à erosão e ao desgaste metal-metal.

Algumas destas ligas mantêm uma dureza elevada até 825°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem de 1.100°C. As ligas à base de níquel, subgrupo 4B, são especialmente indicadas para peças sujeitas ao mesmo tempo à corrosão e ao desgaste. São superiores a outros materiais de revestimento duro em aplicações nas quais o desgaste é causado pelo contato metal-metal, como no caso dos mancais. Mantêm durezas elevadas até cerca de 650°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem de 875°C.

Os materiais do grupo 5 consistem de grânulos duros de carbonetos distribuídos em uma matriz metálica. São muito indicados para aplicações de abrasão intensa e de corte. Inicialmente se empregam apenas os carbonetos de tungstênio. Mais recentemente outros carbonetos, principalmente titânio, tântalo e cromo, passaram a ser usados com bons resultados. Como matriz metálica, vários materiais têm sido utilizados, tais como ferro, aço carbono. Ligas à base de níquel, à base de cobalto e bronze. Os materiais do grupo 5 possuem a máxima resistência à abrasão em peças sujeitas a impactos pequenos ou moderados.

2.8.2.3 - Seleção do Material para Revestimento Duro

A primeira medida é caracterizar bem as condições de serviço nas quais deverá trabalhar o equipamento que será revestido com o revestimento duro. Em seguida, deve-se analisar com cuidado as interações dos materiais candidatos e do metal base, bem como o processo de soldagem a ser utilizado no revestimento.

2.8.2.4 - Pontos Necessários para a Seleção do Material do Revestimento:

- ✚ Analisar as condições de serviço para determinar os tipos de resistência ao desgaste e resistência ao ambiente seleção de alguns materiais candidatos;

- ✚ Análise de compatibilidade entre as ligas e o metal base, considerando possíveis tensões térmicas e eventuais trincas;
- ✚ Testar componentes recobertos com os materiais candidatos;
- ✚ Selecionar a melhor liga, considerando o custo e a duração do recobrimento;
- ✚ Selecionar o processo de recobrimento duro, considerando a taxa de deposição, o grau de diluição (o metal base dilui a liga de recobrimento durante a soldagem), eficiência de deposição e custo total. O custo total inclui o preço dos eletrodos e o processamento.

2.9 - Tipos de Revestimento

Os tipos de revestimento mais aplicados em soldagem podem ser classificados em:

- ✚ endurecimento superficial;
- ✚ resistentes à corrosão;
- ✚ resistentes ao desgaste e/ou impacto;
- ✚ para recuperação ou reparos de manutenção.

2.9.1 - Guia para Seleção de Ligas para Recobrimento Duro

Tabela – 2.4 Guia para Seleção de Ligas para Recobrimento Duro

Condições de serviço	Materiais para recobrimento duro
Escorregamento metal – metal; altas tensões de contato.	Stellite 1, ligas Tribaloy
Escorregamento metal – metal; baixas tensões de contato.	Aços de baixa liga para recobrimento duro
Escorregamento metal – metal; combinado com corrosão e oxidação.	Ligas à base de cobalto ou à base de níquel, dependendo da agressividade do

	ambiente.
Abrasão sob baixa tensão; erosão por colisão de partículas de pequeno ângulo.	Ferros fundidos de alta liga
Abrasão severa sob baixa tensão, retenção do gume.	Materiais com altos teores de carbonetos
Erosão por cavitação e por colisão Choques mecânicos intensos combinados com corrosão ou oxidação	Ligas à base de cobalto Stellite 21, Stellite6
Abrasão por sulcamento	Aços – manganês austeníticos
Descamação	Stellite 21, Stellite 6, Tribaloy T-400, Tribaloy T-800
Estabilidade térmica e/ou resistência à fluência a altas temperaturas	Ligas à base de cobalto, ligas de níquel com carbonetos

2.9.2 - Vantagens e Desvantagens dos Processos para Deposição de Revestimento de Superfícies

A Tabela 2.5 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos principais processos de deposição de revestimentos superficiais.

Tabela 2.5 - As principais vantagens e desvantagens dos principais processos de deposição de revestimentos superficiais

Processo	Vantagens	Desvantagens
Galvanização iônica	Boa resistência à corrosão, baixa temperatura de processamento, deposição em furos e ranhuras.	Seleção restrita de materiais de revestimento, revestimentos relativamente macios, riscos ambientais, precisão limitada para repetição na superfície.
PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)	Temperaturas de processo muito abaixo das do CVD, temperaturas baixas, revestimentos precisos.	Adequado apenas para furos e ranhuras.
PVD (Physical Vapour Deposition)	Ecologicamente seguro, permite grande variedade de revestimentos; temperatura de revestimentos mais baixa do que a de tratamento térmico final da maioria dos aços, espessura reduzida, reproduzível com precisão, resistência elevada ao desgaste, baixo coeficiente de atrito.	Revestimento de furos e ranhuras – alcança profundidade igual ao diâmetro ou largura da abertura; resistente à corrosão em determinadas condições apenas; revestimento uniforme depende de as peças girarem durante o processamento.
Difusão	Boa resistência à corrosão, boa reprodutibilidade.	Revestimentos relativamente macios, seleção restrita de material de base, tempo de processamento longo, riscos ambientais, necessidade de pós-tratamento.
CVD (Chemical Vapour Deposition)	Elevada resistência ao desgaste, produção econômica de	Temperaturas de processamento elevadas, impossibilidade de revestir vários metais,

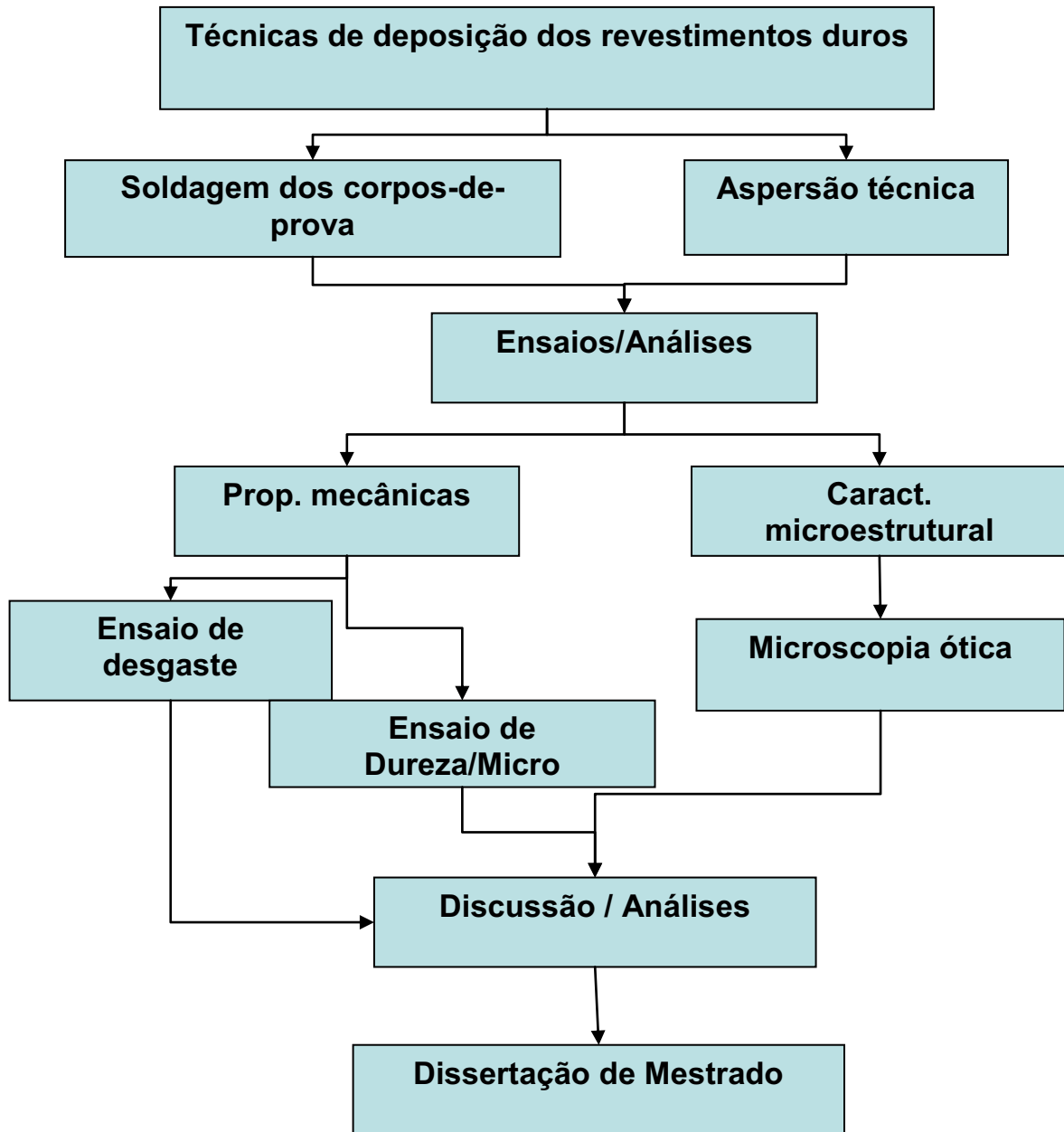
	revestimentos espessos; adequado para furos e ranhuras.	arredondamento de bordos, riscos ambientais.
--	---	--

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3 - Materiais e Métodos

3.1 – Fluxograma do Desenvolvimento Experimental



3.2 - Critérios de Seleção dos Elementos de Penetração no Solo de Equipamentos Rodoviários.

Os elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários, objeto deste estudo, foram selecionados dentre os que foram considerados como um dos mais representativos na avaliação referentes aos custos de manutenção e de considerável atraso nos cronogramas de trabalho nas frentes de trabalho de conservação e construção rodoviária.

Os elementos escolhidos para os estudos comparativos e para a análise de desgaste na forma de desgaste abrasivo a dois corpos foram as unhas da caçamba da pá carregadeira de rodas articuladas, utilizadas em serviços leves e pesados de escavação e carregamento de agregados na forma, principalmente, de solos lateríticos.



Figura 3 .1. Vista lateral de uma unha de pá carregadeira



Figura 3.2. Vista de topo de uma unha de pá carregadeira

Dentre os equipamentos rodoviários utilizados para construção e conservação de rodovias, alguns apresentam ferramentas de penetração no solo de uso contínuo e outras somente quando a atividade se torna necessária, como pontas de escarificadores de solos. Existem ainda outros elementos de máquinas que apresentam desgaste elevado em função dos mesmos manterem um contato direto com o solo, como os elementos que compõem o conjunto do material rodante de tratores de esteiras, de escavadeiras hidráulicas e de pás carregadeiras tracionadas por esteiras, desgaste este que, por acontecer entre elementos que estão em movimento relativo entre si, é considerado como desgaste abrasivo a três corpos. Alguns fabricantes, com a finalidade de prolongar a vida útil desses elementos, passaram a utilizar esteiras vedadas e lubrificadas para evitar o contato direto dos elementos em movimento relativo.

O primeiro passo no desenvolvimento do projeto de avaliação comparativa e na análise de rendimento dos dois processos de revestimento superficial e do material

comercialmente encontrado e utilizado foi a confecção dos corpos de prova seguindo as especificações da norma que regulamenta estudos tribológicos, ou seja, a ASTM G65-91.

Os materiais de base, após ser analisados quanto à perda de massa no período de 2.900 horas, foram cortados nas dimensões especificadas pela norma ASTM G65-91 para ser submetidos aos ensaios de dureza pelo método Rockwell C, e resistência à abrasão por meio do ensaio pela roda de borracha. O mesmo procedimento foi executado aos corpos de prova revestidos por soldagem de endurecimento superficial, bem como pelo processo de aspersão térmica pelo método LVOF. Após o corte, esses corpos-de-prova foram submetidos a algumas operações de usinagem, com a finalidade de adquirir suas formas planas e retiradas de escórias provenientes do processo de soldagem.

3.2.1 – Técnicas Utilizadas nas Aplicações dos Revestimentos

3.2.1.1 - Revestimento Duro pelo Processo de Soldagem

Uma das técnicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho e que se tornou fator de análise e comparação de resultados de maior e menor desempenho, foi o revestimento duro pelo processo de soldagem, em que foi utilizado a soldagem de revestimento com eletrodo revestido.

O processo de revestir superfícies pelo processo de soldagem pode ser aplicado em peças novas, bem como na recuperação de peças desgastadas pelo uso. É um processo de aplicação simples, necessitando apenas das varetas das ligas de recobrimento e de uma chama oxiacetilênica ou de um arco elétrico. O processo tem a vantagem de poder ser aplicado a áreas localizadas da peça que sejam mais sujeitas ao desgaste (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

As varetas dos materiais de revestimento são fornecidas em dois tipos: revestidas, para soldagem a arco, e não revestidas, para soldagem oxiacetilênica. A soldagem oxiacetilênica produz depósitos mais uniformes e que podem ser mais bem posicionadas na peça, com velocidades de aquecimento e resfriamento relativamente baixas. Por outro lado, a soldagem a arco é um processo menos caro, mais rápido e se presta melhor à utilização de equipamentos automáticos. Os depósitos obtidos com arco elétrico em geral são mais grosseiros e apresentam maior tendência à formação de poros. Há também maior probabilidade de formação de trincas, em função dos gradientes de temperatura criados para altas velocidades de aquecimento e de resfriamento (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

O material de revestimento é fundido durante a soldagem e se espalha sobre o metal base, ligando-se com este e formando uma nova superfície, com uma camada que varia entre 1,5 mm a 6,0 mm. Apenas uma camada superficial da peça atinge a temperatura de fusão, o que evita uma contaminação muito acentuada do revestimento do metal base, que diminuiria as propriedades de resistência ao desgaste da camada depositada.

O revestimento duro pode ser aplicado à maioria dos metais não ferrosos. Por outro lado, com algumas exceções, não se recomenda o revestimento de ligas não ferrosas com o ponto de fusão inferior a 1100°C. Os aços – carbonos podem ser recobertos com relativa facilidade, em especial se o teor de carbono for inferior a 0,35%. A soldagem se torna mais difícil à medida que o teor de carbono aumenta, sendo que os aços de alto carbono e os aços ligados devem sofrer um pré – aquecimento e após revestimento devem ser recozidos. Os aços inoxidáveis, os ferros fundidos e os aços rápidos também podem ser recobertos, utilizando – se técnicas adequadas de soldagem. O cobre, bronze e ligas como o latão

apresentam maiores dificuldades de soldagem, em função de seus pontos de fusão serem baixos e sua alta condutividade (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

O revestimento duro é muito usado nas aplicações em uma lubrificação regular contra abrasão, seja impossível ou inviável, como em ferramentas de perfuração de poços de petróleo, equipamentos para a agricultura e para terraplenagem, ferramentas para mineração e equipamentos para a indústria petroquímica. O processo também é usado para ampliar a duração de peças que recebem lubrificação, tais como matrizes de conformação mecânica e áreas localizadas de órgãos de máquinas extremamente sujeitas a desgaste. Superfícies com revestimento duro são, em geral, mais resistentes ao desgaste, ao calor e à corrosão do que superfícies cementadas ou temperadas por chama.

Além disso, áreas de difícil acesso em componentes grandes, praticamente impossíveis de ser submetidas a um processo de tratamento térmico, podem receber um revestimento duro. A técnica pode também ser empregada para a recuperação de equipamentos pesados sem a necessidade de desmontá-los (BATISTA, NASCIMENTO, www.spectru.com.br).

3.2.1.2 – Revestimento superficial por aspersão através das técnicas HVOF e LVOF

Foi também aplicada a técnica de revestimento por aspersão térmica especificamente pelo método de LVOF, de acordo como é relatado a seguir o desenvolvimento do processo.

3.2.1.3 - HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)

Dentre os processos de aspersão térmica, utilizados para aplicar revestimentos resistentes ao desgaste, o processo de aspersão oxicom bustível de alta velocidade,

conhecido como HVOF (High velocity oxy fuel) tem sido um dos mais utilizados, principalmente na aplicação de carbonetos. O processo é baseado em um sistema de combustão interna de alta pressão, similar a um motor de foguete em miniatura. Combustível e oxigênio são misturados para produzir um jato de gás supersônico acima de 2000 m/s e 2800°C (Lima et al. apud Thorpe et al. 1998). Os combustíveis usados incluem querosene, hidrogênio, propileno, propano, acetileno, metil-acetileno, propadieno e gás natural. O material em forma de pó é introduzido na chama quente dentro do cano de saída da pistola. Os revestimentos produzidos apresentam maior dureza, adesão ao substrato, durabilidade e maior possibilidade de espessura do que os revestimentos produzidos por outros processos de aspersão térmica. Uma vantagem inerente do processo HVOF é sua habilidade de aspergir partículas semi-fundidas a altas velocidades (em torno de 900 m/s), resultando em um revestimento bastante denso, com alta adesão ao substrato e baixo conteúdo de óxidos. Carbonetos superaquecidos podem se decompor e formar fases menos benéficas ao revestimento. O processo HVOF é bastante efetivo ao acelerar bastante as partículas sem excesso de aquecimento (LIMA, CAMARGO, 2001).

Carbonetos de vários tipos são especialmente adequados para aplicação por HVOF, pois não requerem significativa fusão para se depositar e formar uma superfície efetiva contra desgaste. Composições típicas estão entre 8 a 30% de conteúdo da liga matriz, que serve primariamente como ligante para as partículas de carboneto (Lima et al. apud Thorp et al., 2000). Uma das ligas mais usadas para aplicações de desgaste tem sido a liga WC-Co (Lima et al. apud Korpiola & Vuoristo 1996), às vezes ligada a outros elementos como Ni e Cr, no intuito de oferecer melhores características de resistência à corrosão e desgaste combinado (Lima et al. apud Berger et al., 2001)

3.2.1.4 - LVOF (Low Velocity Oxigen Fuel) Flame Spray - Pó

O processo LVOF (Low Velocity Oxigen Fuel) pó, consiste em injetar o material a ser depositado, em forma de pó, na chama derivada da queima de oxigênio e acetileno (3100°C), sendo o material aquecido e projetado contra o substrato previamente preparado.

Em algumas variações do processo, um jato de ar comprimido auxilia a acelerar e atomizar o pó. Pode-se efetuar a fusão da camada após aplicação do revestimento, aumentando assim a aderência e resistência do material aplicado.

Os principais materiais aplicados por este processo são:

- Ligas Base de Níquel como Incinel, Monel, NiCrBSi e outras.
- Óxido de Cromo
- Alumina e Alumina – Titânio e Dióxido de Titânio
- Óxido de Zirconia
- Ligas Base de Cobalto – Stellite.

3.2.1.5 - LVOF (Low Velocity Oxigen Fuel) Flame Spray – Arame

O processo de aspensão LVOF Arame utiliza como fonte de calor para fusão do arame a chama gerada pela queima de oxigênio e acetileno.

A atomização e aceleração do material fundido são realizadas por um jato de ar comprimido que cerca a chama do oxigênio e acetileno.

Os principais materiais aplicados por este processo são:

- Aço carbono como ligas 1020, 1045, 1080 e outros.

- Aço inox como ligas AISI 302, 304, 316 e AISI 410,420 etc.

- Ligas de Níquel

- Alumínio

- Zinco

- Estanho.

3.2.2 - Materiais

3.2.2.1 - Material de Referência

O material que foi utilizado como referência na análise comparativa dos processos de revestimento foi retirado de amostras de unhas de caçambas de pás carregadeiras de rodas na sua forma original, ou seja, fornecida pelo fabricante do equipamento rodoviário e seguindo os padrões determinados pela norma ASTM G65-91. Por se tratar de materiais originais, ou seja, fornecido pelo fabricante da máquina, foi constatado por meio de avaliações primárias como mais resistentes ao desgaste abrasivo e comprovado através do número de horas em que os elementos foram submetidos em operações de escavamento e carregamento.

3.2.2.2 - Material de Base dos Processos por Soldagem e por Aspersão

O material de base utilizado na confecção dos corpos de prova para análise de resistência ao desgaste abrasivo pelos processos por soldagem e por aspersão térmica foi o aço ABNT 1015, com as seguintes dimensões: 75 mm de comprimento, 24 mm de largura

e 4mm de espessura, nas amostras por soldagem e 48 mm de comprimento, 24 de largura e 4mm de espessura nas amostras aspergidas. Tais dimensões se fizeram necessárias para atender à norma, como também para permitir um encaixe perfeito ao suporte do abrasômetro nos ensaios de perda de massa.

3.2.2.3 - Consumíveis Utilizados

Os consumíveis utilizados para revestir os corpos de prova nos processos de revestimento superficial por soldagem foram os eletrodos para abrasão severa, erosão e cavitação de fabricação Bohler Thyssen Welding, tipo UTP 713 desenvolvimento especial, com as seguintes concentrações: C-4%, Cr-23,5%, Mo-6,5%, Nb-6,0%, W-0,8%, V-0,9%, com dureza de 65HRC.

Os revestimentos por soldagem executados nos corpos-de-prova foram feitos na empresa Engincom Comércio e Indústria LTDA., situada no Distrito Industrial de Teresina-PI.

Já os corpos de prova revestidos pelo processo de aspersão térmica por LVOF, utilizaram como consumível nas amostras tipo P uma mistura composta de 17,0% de Cr, 4,0% de Fe, 4,0% de Si, 3,5% de B, 1,0% de C e Ni balanceado. As amostras tipo M foram revestidas utilizando como consumível a mesma mistura utilizada no revestimento das amostras tipo P com a adição de 10% de carboneto de tungstênio com base cobalto (81% de tungstênio + 12% de cobalto + 5% de carbono + 2% de ferro).

Foram utilizados dois tipos de consumíveis nas amostras revestidas por aspersão térmica, com a finalidade de se avaliar também o comportamento dos revestimentos, quanto a resistência ao desgaste abrasivo utilizando-se os ensaios de resistência ao desgaste

e de dureza nos dois tipos de consumíveis. Levando-se em consideração principalmente o custo do revestimento.

Os corpos-de-prova que foram revestidos pelo processo de aspersão térmica, tipo LVOF, foram executados na empresa Ogramac Nordeste, situada no Distrito Industrial de Suape, em Ipojuca-PE.

3.2.2.4 - Areia

A areia utilizada no ensaio de abrasão para constatação da perda de massa foi a areia quartzosa industrial com granulometria de 40 a 60 mesh, fornecida pela empresa Sand SL Comércio de Minério LTDA., de São Carlos-SP. Esta areia foi submetida a um sistema de peneiramento, de modo a adequar a sua granulometria às dimensões especificadas pela norma ASTM G65-91, que estabelece um percentual de 5% de máxima retenção na peneira de 50 mesh e de 90% de mínimo na peneira de 60 mesh.

3.2.3 - Equipamentos

3.2.3.1 - Equipamento de Soldagem

Foi utilizado um transformador de solda de fabricação bambozzi, modelo TDC 460 E, com as seguintes características técnicas: Corrente máxima de solda de 430 A, trifásico com tensão de alimentação de 380V, potência nominal de 20,8 kVA, frequência de 50/60Hz, características de soldagem DC e dimensões (AxLxC) de 480x555x665.

3.2.3.2 - Sistema de Peneiramento da Areia

A máquina utilizada para peneirar a areia, no ensaio de abrasão por roda de borracha, foi desenvolvida e construída no Departamento de Engenharia de Materiais da

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. É constituída de duas peneiras superpostas, com malhas de 50 e 70 meshes segundo a AFS, fixadas em uma estrutura de aço que sofre movimento vibratório promovido por um motor de $\frac{1}{4}$ de HP, em cujo eixo está afixada uma peça assimétrica para provocar um efeito excêntrico na rotação e conseqüente vibração, como mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3 - Sistema de peneiramento da areia para o ensaio de abrasão

3.2.3.3 Abrasômetro

O abrasômetro utilizado no ensaio de abrasão por perda de massa também foi desenvolvido e construído nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, segundo a norma ASTM G65-91. Esta norma determina que seja feita uma calibração do abrasômetro, de modo que o mesmo possa ser utilizado de forma confiável, assegurando as mesmas condições e reprodutividade dos ensaios de perda de volume.

O anel de borracha é constituído de clorobutil com diâmetro externo inicial de 228,6 mm e espessura de 12,7 mm, com dureza variando entre 59 e 60 shore A. A excentricidade do anel não deve exceder a tolerância de 0,05 mm. Com este diâmetro especificado, e para um número total de 6000 rotações, o comprimento linear de realização do ensaio é de 4.309 m. À medida que a roda se desgasta, deve-se ajustar a perda de volume (PV) como prevê a norma. O fluxo de areia recomendado é de 300 g/min a 400 g/min, que deverá escoar pelo bocal de alimentação de forma regular e contínua, como mostra a Figura 3.4.

Faz parte da constituição do abrasômetro um contador digital do número de voltas efetuadas pela roda de borracha até o limite estabelecido de 6000 rotações, em que o mesmo deverá provocar o desligamento automático. Possui ainda um sistema de alarme com parâmetros de limites de rotações por min de mínimo 190rpm e de máximo 210 rpm, e tendo como rotação referência 200 rpm (BRANDIM, 1998).



Figura 3.4 – Abrasômetro de Roda de Borracha

3.2.3.4 - Corte, Usinagem e Pesagem dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova revestidos pelos processos de soldagem e por aspensão térmica foram retificados e cortados em uma retificadora plana longitudinal de fabricação Mello S/A Máquinas e Equipamentos, modelo RPT 2, máquina nº 192, ano 1983, nos laboratórios de usinagem do CEFET – PI, com refrigeração na área de corte através de fluido especial emulsionável em água e tendo como ferramenta de corte um disco abrasivo de alta rotação (6000 r.p.m.) e elevada dureza, da ordem de 70 HRC, fornecido pela empresa Arotec, modelo AA 5.

Anteriormente ao corte das amostras nas dimensões especificadas pela norma ASTM G65-91, os corpos de prova passaram por um processo de retificação, com o objetivo de reparar possíveis deformações e melhorar o acabamento das amostras.

As medidas de massa dos corpos de prova, para determinação da massa antes e depois do ensaio de abrasão por roda de borracha, foram efetuadas em uma balança de precisão analítica marca Marte, modelo AS 2000C, com capacidade de pesagem máxima de 2000g e mínima de 0,5g, erro de 0,1g e sensibilidade de 0,01g.

3.2.3.5 - Durômetro

As medidas de dureza foram efetuadas em um durômetro marca Sussen Wolpert, tipo Testor HT1, máquina Nº 333, ano 1971, em escala Rockwell C com carga de 150 kgf, como mostra a Figura 3.5, pertencente ao laboratório do DEMa da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).



Figura 3.5 - Durômetro

3.2.3.6 - Microscopia Ótica

As análises e imagens de microscopia ótica foram realizadas no microscópio ótico de marca NIKKON EPIPHOT – DX com conversor de sinais da Hitach, modelo com aumento máximo de 1000 vezes. Para obtenção das fotos das microestruturas, utilizou-se um analisador de imagens.

3.3 - Seqüência Experimental

Após os procedimentos convencionais de preparação das amostras nas três condições que serão avaliadas, ou seja, soldadas, revestidas superficialmente por aspensão térmica e na condição normal ou comercialmente encontradas, estas amostras ou corpos-de-prova passaram à fase experimental.

Os experimentos tiveram como finalidade inicial avaliar o desempenho quanto à resistência à abrasão dos corpos-de-prova quando submetidos aos processos de revestimento superficial pelos processos de soldagem e por aspersão térmica.

Tais experimentos se basearam principalmente em análises microscópicas por meio de microscopia ótica, resistência à abrasão pelo ensaio da roda de borracha e pela análise do nível de dureza adquirida através do durômetro.

Depois de computados os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos nas três avaliações diferentes, microscopia, dureza e resistência à abrasão, partiu-se para a análise matemática através das médias, em função de resultados diferentes obtidos nos ensaios, em pontos diferentes das amostras.

3.4 – Métodos

3.4.1 - Planejamento Experimental

3.4.1.1 - Ensaio de Desgaste por Abrasão a Baixa Tensão ASTM G65-91

Os corpos-de-prova foram preparados e ensaiados segundo os procedimentos da norma ASTM G65-91 (1991) no abrasômetro similar ao apresentado na figura. A força exercida pelo corpo de prova sobre a roda foi de 130 N. A rotação da roda de borracha foi mantida em mais ou menos 200 r.p.m., com variações para mais e para menos de 10 r.p.m., quando em movimento e sob pressão de ensaio. Empregou-se para a contagem do número de giros da roda de borracha um sensor indutivo. O número total de rotações da roda para interrupção automática do ensaio foi pré-fixado em 6000 rotações. Para a retificação da superfície do anel de borracha quando se fez necessário, utilizou-se uma lixa de granulometria 320, mantendo-se o braço da alavanca do equipamento livre de qualquer

carga, para evitar qualquer pressão sobre a roda e proporcionar uma folga suficiente para a introdução da lixa entre a roda e a amostra. O fluxo de areia foi mantido dentro dos limites da norma ASTM G65-91 (1991), tendo variado entre 350 e 360 gramas/minuto.

Os ensaios foram realizados com a roda de borracha girando no mesmo sentido da direção de soldagem empregado. Após o ensaio de cada lote, realizou-se a retificação da superfície do anel de borracha. As perdas de massa e de volume, conforme a norma ASTM G65-91 (1991), quando são determinadas em uma roda de borracha com diâmetro externo diferente de 228,6 mm, devem ser corrigidas linearmente pela relação perda de volume (PV) x 228,6 mm/diâmetro da roda no final do ensaio, tendo sido empregada, quando necessário, esta correção (BRANDIM, 1998).

3.4.1.2 Microscopia Ótica.

As amostras revestidas por aspersão térmica LVOF dos tipos P e M e soldadas foram analisadas no microscópio ótico com aproximação de 50X, 100X, 200X e 500X.

3.4.1.3 Ensaio de Dureza

Para a determinação da dureza foi utilizado o método Rockwell C, com carga de 150 kgf. Antes de efetuar as medidas, foi realizada a aferição do aparelho ou durômetro, por meio da utilização de corpos-de-prova de dureza padronizada. Cada corpo-de-prova foi submetido a, no mínimo, três medidas de dureza, em pontos diferentes da superfície.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4 - Resultados e Discussão

4.1 - Introdução

Por meio dos ensaios já efetuados e comentados no capítulo anterior e utilizando-se a metodologia descrita, inicialmente serão representados os resultados de aferição e qualificação do abrasômetro realizados segundo a norma ASTM G65-91(1991). Procedimento A, resistência ao desgaste, resultados dos ensaios de dureza e análises químicas de microscopia ótica e terminando com as discussões que se fizeram relevantes dos resultados obtidos.

4.1.1 - Procedimentos Adotados no Desenvolvimento do Trabalho

Foram levantados dados estatísticos do rendimento apresentado pelos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários, no que concerne à vida útil proporcionada pelos diversos produtos apresentados no mercado, bem como a qualidade destes materiais no que diz respeito a: constituição da liga, tratamentos térmicos efetuados e revestimento superficial em peças novas ou recuperadas na forma de endurecimento com a finalidade de elevar a resistência ao desgaste.

No levantamento de dados e de informações foram considerados os rendimentos obtidos pelas ferramentas de penetração no solo de equipamentos rodoviários quando utilizadas na sua forma original, ou seja, de acordo com a forma comercial fornecida por parte dos fabricantes. Foi considerada a vida útil atingida com a ferramenta quando utilizada na sua forma comercial, bem como quando aplicado seu revestimento específico.

Foram confeccionados corpos de prova seguindo a norma específica para revestimentos duros, ou seja, ASTM G65-91.

Os corpos-de-prova foram revestidos por soldagem de revestimento utilizando eletrodos com as seguintes características: eletrodo básico que apresenta depósitos de carbonetos complexos de Cr, Mo, Nb, W e V, indicado para revestimentos duros contra abrasão severa, erosão e cavitação de fabricação BOHLER THYSSEN WELDING. Tipo UTP 713 desenvolvimento especial com concentração de elementos na seguinte composição: C - 4%, Cr - 23,5%, Mo - 6,5%, Nb - 6,0%, W - 0,8% e V - 0,9%, com uma dureza esperada de 65HRc.

Foram também revestidos pelo processo de revestimento superficial por aspersão térmica do tipo LVOF.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram determinadas as perdas de massa, bem como de espessura dos elementos objeto do estudo antes e depois de revestidos pelos processos de recobrimento por soldagem e por aspersão térmica.

Os corpos-de-prova foram ensaiados para análise de resistência ao desgaste abrasivo por meio do abrasômetro de roda de borracha que foi construído pelos alunos mestrando em engenharia de materiais da Universidade Federal de São Carlos UFSCar na área específica tribológica seguindo as recomendações da norma ASTM G65-91.

Foram executados estudos comparativos de rendimento e viabilidade econômica quando comparadas estas ferramentas de penetração no solo de equipamentos rodoviários utilizadas na sua forma comercial, bem como quando revestidas pelos processos de endurecimento superficial por soldagem e por aspersão térmica.

4.2 - Aferição e Qualificação do Abrasômetro Segundo a Norma ASTM G65-91; Procedimento A

De acordo com esta norma, o abrasômetro deverá, antes da realização dos ensaios de desgaste, ser aferido. Para tanto, utilizou-se um aço ABNT 1015 para a determinação do coeficiente de variação dos resultados obtidos com o ensaio de desgaste, visando à verificação da dispersão dos valores e da reprodutibilidade do equipamento. A conversão é feita pela seguinte equação:

$$PV(mm^3) = \frac{PM(g)}{\alpha(g/cm^3)} \times 1000$$

Onde: PV (mm³) = Perda de volume; PM (g) = Perda de Massa e α = (g/mm³) densidade do material.

Segundo o apêndice A da norma ASTM G65-91, o desvio padrão S a ser calculado é obtido com o auxílio da tabela 4.1 da referida norma, para a obtenção do valor de d_2 , que é dependente do número de corpos-de-prova utilizados no ensaio de desgaste por abrasão. Então, a partir do desvio padrão, da diferença entre a maior perda de volume e a menor perda de volume, calcula-se o coeficiente de variação (V). Tem-se, então:

Como o valor obtido neste processo de aferição foi inferior ao limite de 7% estabelecido pela norma ASTM G65-91(1991), fica assegurada a confiabilidade dos resultados obtidos com o abrasômetro. Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão à baixa tensão realizada com aço ABNT 1015 para obtenção do coeficiente de variação do abrasômetro.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão à baixa tensão realizada com o aço ABNT 1015 para obtenção do coeficiente de variações do Abrasômetro.

Corpos-de-prova	Massa (g)			PV (cm ³)
	M _i	M _f	ΔM	
01	12.8910	12.5017	.3893	9,5924
02	12.9257	12.5721	.3536	5,0446
03	07.7076	07.3516	.3560	5,3503
04	09.3156	08.9095	.4061	1,7325
05	07.7034	07.3005	.4029	1,3248
Total				4 9

Onde: M_i = Massa do corpo de prova antes do ensaio

M_f = Massa do corpo de prova depois do ensaio

ΔM = Diferença de massa antes e após o ensaio

PV = Perda de volume.

4.3 - Resistência ao Desgaste

A análise da resistência ao desgaste é feita pela comparação com um material de referência. Neste estudo, foi utilizado o próprio material constituinte das unhas da caçamba de uma pá carregadeira articulada de rodas. Para a visualização geral dos materiais envolvidos neste trabalho, é apresentada, na figura 4.1 uma comparação da perda de volume no qual os valores são as médias de todos os ensaios realizados.

Na primeira imagem é representada a amostra que foi revestida pelo processo de soldagem, em que fica demonstrada a menor perda de massa em função do consumível utilizado no processo, que possuía uma grande concentração de elementos de liga que propiciam elevada resistência ao desgaste.

Na segunda imagem, temos a representação de uma amostra revestida pelo processo de aspersão térmica por LVOF, em que também fica demonstrada uma elevada resistência ao desgaste abrasivo, embora de menor intensidade que na soldagem, que admitimos ter ocorrido em função do procedimento utilizado no ensaio, “procedimento A” não ser recomendado a tal amostra, por se tratar de revestimento de espessura pequena, da ordem de 0,5mm, o que é considerada pequena para tal ensaio. Quando o revestimento é de pequena espessura, o procedimento recomendado pela norma G65-91 é o “procedimento C”, em que se utiliza uma menor carga, como também um número menor de revoluções.

Na terceira imagem, temos a representação da amostra de referência, ou seja, retirada da própria unha da caçamba da pá carregadeira de rodas, em que fica demonstrada uma boa resistência à abrasão em função da mesma ter sido constituída de aço carbono 1045 temperado que apresenta uma boa resistência ao desgaste.



Figura 4.1 - Imagens de corpos-de-prova desgastados no ensaio por abrasão

Os dados coletados para a análise do desgaste abrasivo por meio do abrasômetro estão quantificados e apresentados na Tabela 4.2, com as perdas de massa correspondentes a cada uma das amostras analisadas. Na Figura 4.2 mostra o gráfico da perda de massa.

Tabela 4.2 – Determinação da perda de massa e de volume após o ensaio de desgaste

Amostra		M_i (g)	M_f (g)	PM (g)	PV (mm ³)	PV _{Corrigido} (mm ³)
Metal de base	A ₁	91,36	90,44	0,92	45	45
	A ₂	90,50	89,62	0,88		
	A ₃	100,22	99,14	1,08		
	Valor médio			0,96		
Aspersão térmica	A ₁	92,19	92,11	0,08	20	20
	A ₂	90,06	89,97	0,09		
	A ₃	91,07	90,97	0,10		
	Valor médio			0,09		
Revestimentos soldados	A ₁	186,51	186,38	0,13	12	12
	A ₂	156,47	156,40	0,07		

	A ₃	144,22	144,14	0,08		
	Valor médio			0,09		

Onde: M_i = Massa do corpo-de-prova antes do ensaio;

M_f = Massa do corpo-de-prova depois do ensaio

PM = Perda de massa do corpo-de-prova após o ensaio

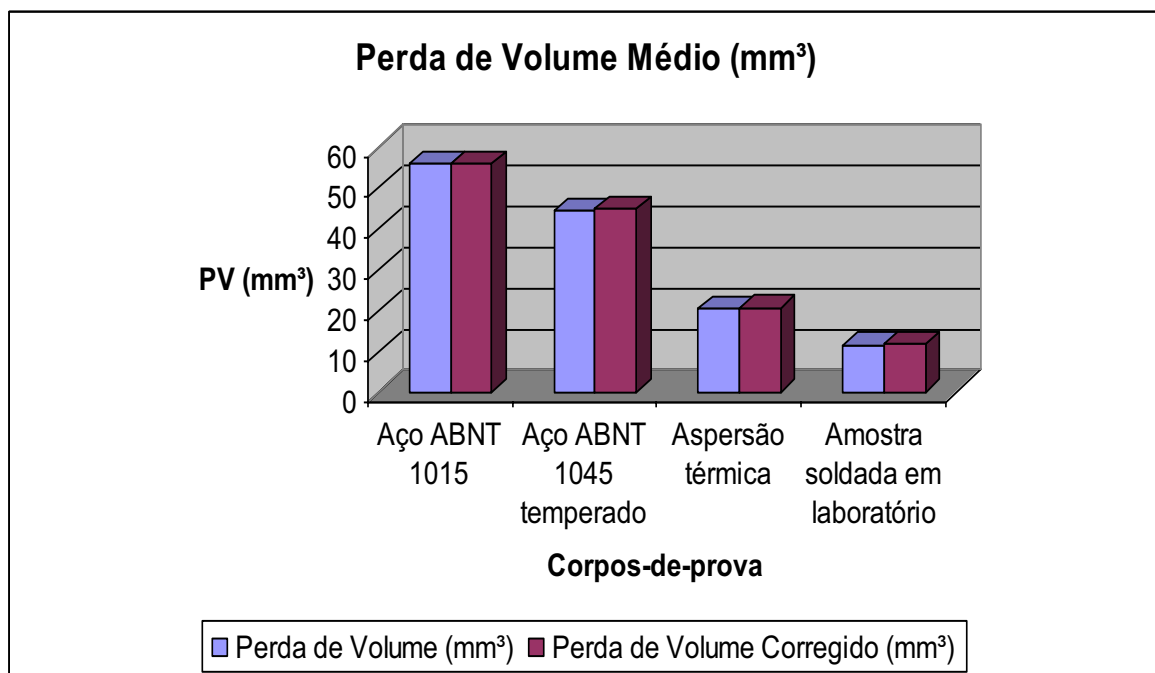


Figura 4.2 – Gráfico da perda de volume dos corpos-de-prova desgastados pelo ensaio de abrasão

4.4 - Dureza

Nos resultados dos valores médios de dureza apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.3, não se nota grandes dispersões dos resultados para os corpos-de-prova quando se analisa entre os mesmos materiais, e nem quando se compara os revestimentos obtidos por técnicas diferentes, no caso por soldagem e por aspersão térmica.

✚ Alguns valores de dureza apresentaram discrepância em relação aos valores médios, que foram atribuídos serem decorrentes do ponto em que o indentador foi posicionado;

✚ O corpo-de-prova utilizado como referência apresentou um bom resultado de dureza, visto que a sua microestrutura é constituída de martensita.

Tabela 4.3 - Valores médios de dureza para os corpos-de-prova em estudo.

Amostra		HRc (150kg)	Valor médio final Dureza HRc
Metal de base	P ₁	46	45
	P ₂	48	
	P ₃	43	
Aspersão térmica	P ₁	53	54
	P ₂	52	
	P ₃	56	
Revestimentos soldados	P ₁	52	53
	P ₂	48	
	P ₃	59	

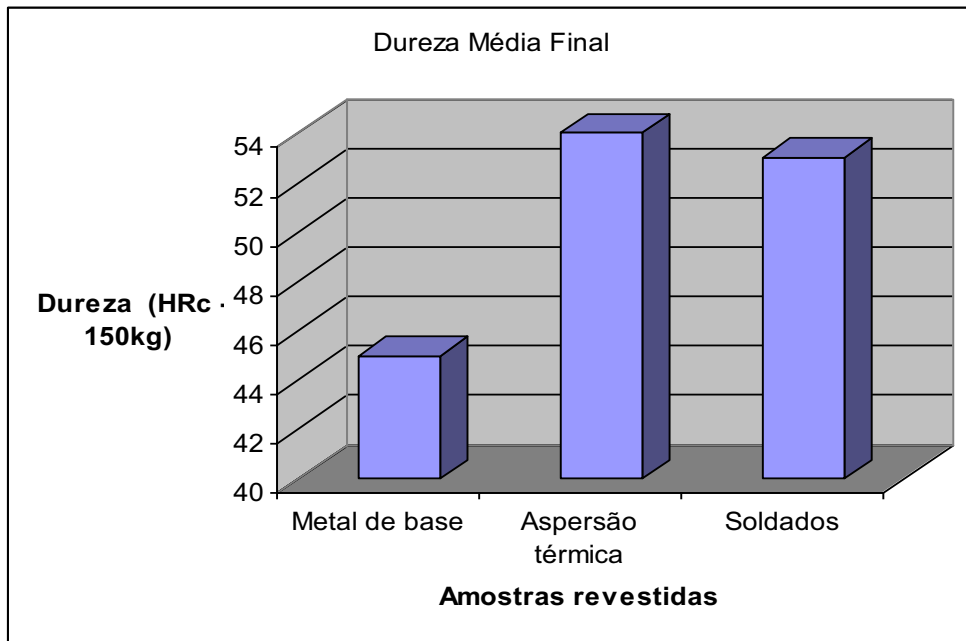


Figura 4.3 – Comparação dos valores médios de dureza entre os materiais estudados.

4.5 - Microdureza

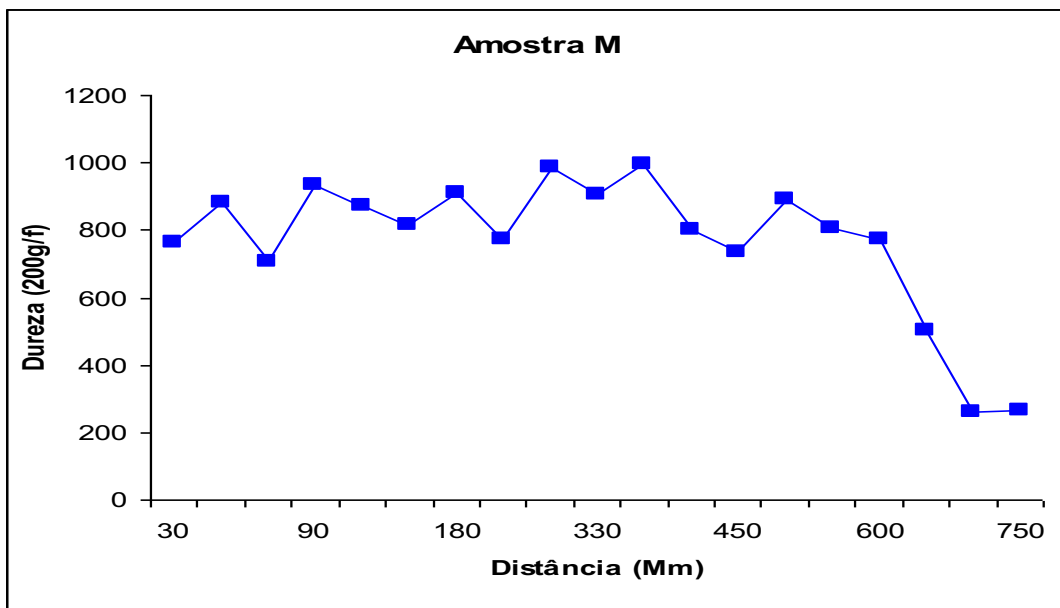


Figura 4.4 - Representação gráfica da microdureza da amostra tipo M

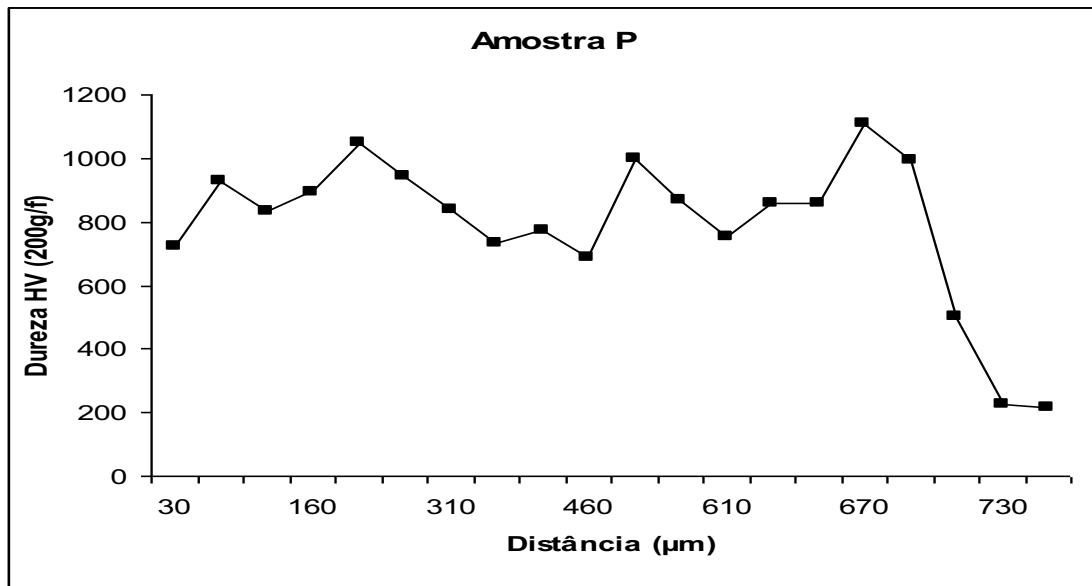


Figura 4.5 - Representação gráfica da microdureza da amostra tipo P

4.6 - Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada para todos os corpos-de-prova estudados nesse trabalho utilizando a técnica de Microscopia ótica.

4.6.1- Microestrutura das Amostras Aspergidas Termicamente

Os corpos-de-prova aspergidos termicamente apresentaram as microestruturas conforme mostram as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8. Nessas pode-se observar uma quantidade significativa de poros, de tamanhos variados, principalmente na interface entre a camada aspergida e o substrato, em destaque na Figura 4.6. A formação desses poros é decorrente da reação com gases durante o processo de aspensão e a atmosfera em contato com o material enquanto líquido.

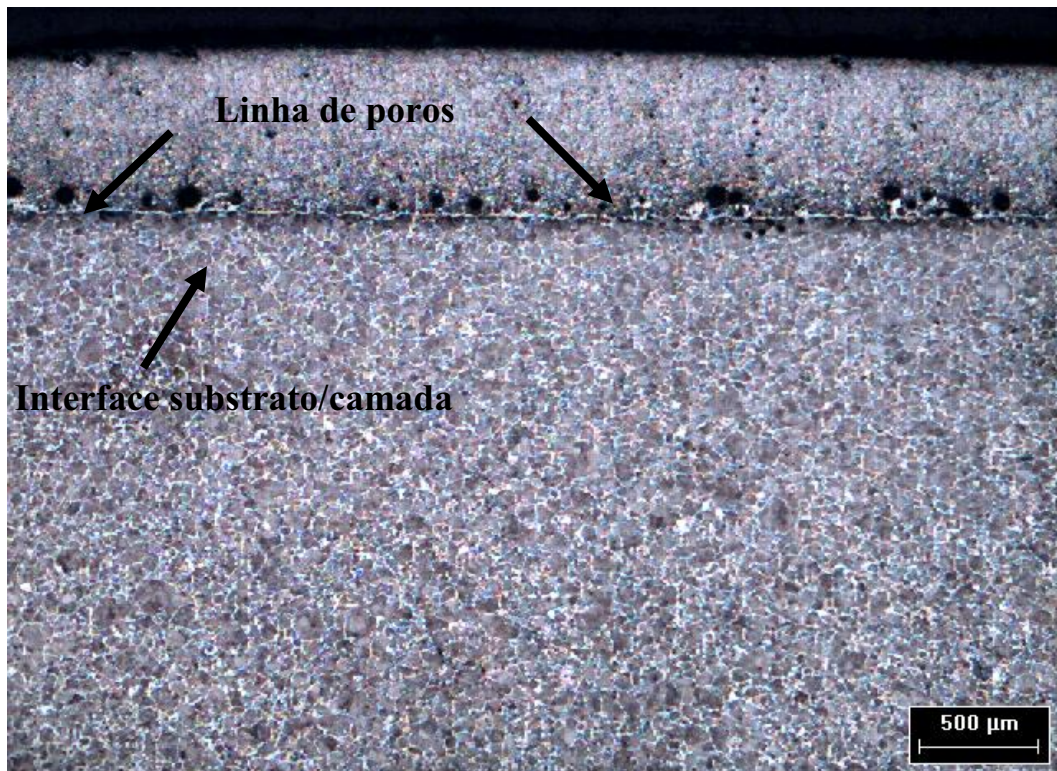


Figura 4.6 – Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. Ataque colorido. 50X.

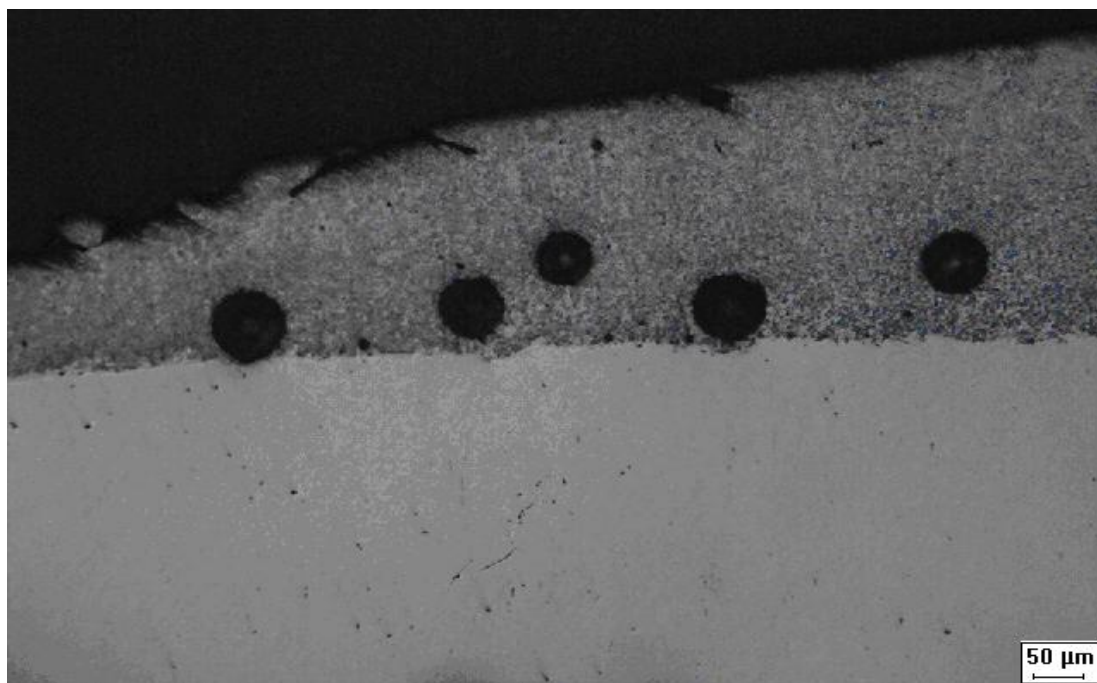


Figura 4.7 - Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. Ataque colorido. 100X.

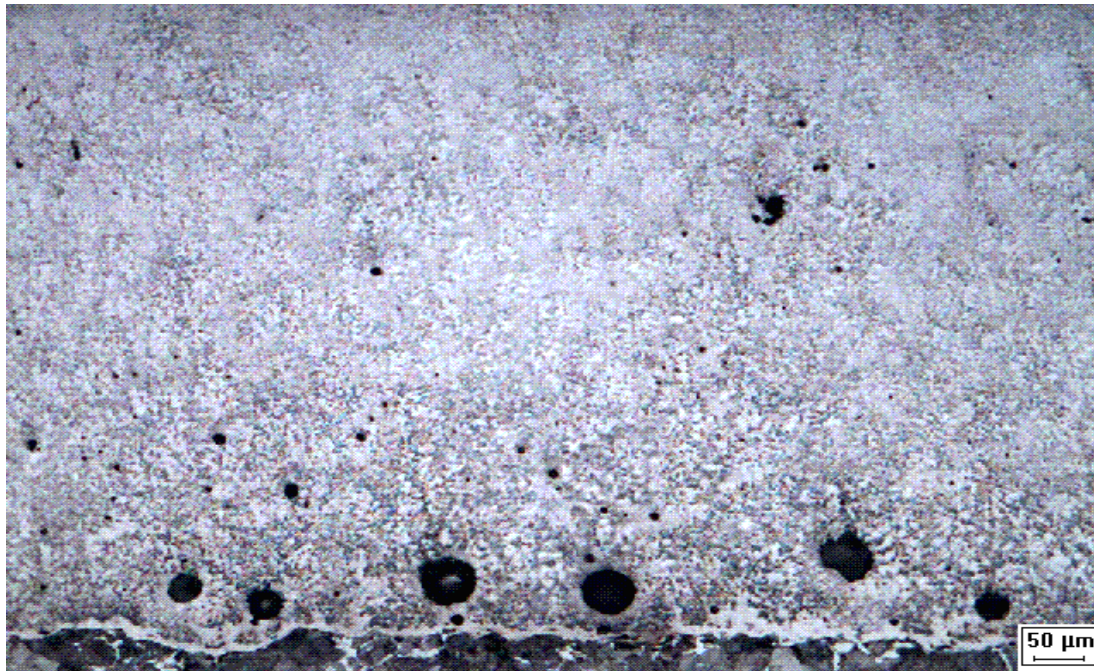


Figura 4.8 - Corpo-de-prova aspergido termicamente, destacando os poros na interface entre a camada e o substrato. A presença de áreas esbranquiçadas que possivelmente possam ser os carbeto de tungstênio. Ataque colorido. 200X

4.6.2 Microestrutura das Amostras Revestidas por Soldagem

Os corpos-de-prova soldados apresentaram microestrutura eutética com intensa quantidade de carbeto de cromo complexos do tipo M_7C_3 conforme mostram as Figuras 4.9 e 4.10. Isto se deve, principalmente pela composição química do eletrodo utilizado, onde apresentou C-4%, Cr-23,5%, Mo-6,5%, Nb-6,0%, W-0,8%, V-0,9%, com dureza de 65HRC.

Estes elementos quando participam da constituição da liga, adicionam e melhoram algumas propriedades mecânicas dos materiais, tais como:

- a) Carbono (C) – Na composição de aços modernos destinados à cutelaria, quer sejam aqueles classificados como carbono ou os ditos inoxidáveis, dificilmente poderá existir menos do que 0,6% de Carbono, pois este é o

principal elemento que após a adequada têmpera, concederá dureza à peça.

- b) Cromo (Cr) – O cromo estimula a formação de carbonetos, aumentando a resistência ao desgaste, bem como a temperabilidade aos aços, reduz a velocidade crítica de resfriamento, de modo que a têmpera de aços com teores elevados de cromo seja feita preferencialmente ao óleo ou ao ar. A adição de cromo torna mais fina a granulação dos aços, aumentando desse modo a sua resistência.
- c) Molibdênio (Mo) – Influencia favoravelmente a dureza, a resistência a quente, a fluência e a temperatura de crescimento de grão de austenita, além de melhorar a penetração da têmpera nos aços. É largamente empregado no aços de construção mecânica para beneficiamento, pois forma partículas resistentes a abrasão e evita a fragilidade de revenimento. O molibdênio não é empregado sozinho, pois apresenta uma tendência de diminuir a tenacidade dos aços.
- d) Nióbio (Nb) – Tem alta afinidade por carbono e nitrogênio, formando carbonetos e carbonitretos. Melhora a soldabilidade, a tenacidade e a conformabilidade, o que levou a ciência moderna a busca de alternativas, que aumentassem a resistência mecânica do aço sem alterar as outras propriedades desejáveis.
- e) Tungstênio (W) – Forma carbonetos muito duros tendo como conseqüência influência nas propriedades com aumento da dureza, aumento da resistência à tração, resistência à corrosão e a erosão.
- f) Vanádio (V) – Eleva a temperatura de crescimento do grão da austenita, promovendo o refino do grão. É excelente desoxidante. A adição de

vanádio confere aos aços uma insensibilidade ao super-aquecimento, melhorando suas características de forjamento e usinagem. O emprego de teores elevados de vanádio deve ser acompanhado por um aumento do teor de carbono, devido à formação de carbonetos.

- g) Silício (Si) – Auxilia na desoxidação, auxilia na grafitização, aumenta a fluidez como influência na estrutura. Aumenta a resistência à oxidação com temperaturas elevadas, melhora a temperabilidade e da resistência a tração influenciando nas propriedades.
- h) Boro (B) – Os aços ao boro compreendem uma família com propriedades especiais, devendo ser tratados como uma classe à parte. O boro, quando adicionado em pequenas quantidades, melhora a temperabilidade do aço, diminui a tendência a triancas de têmpera, distorções durante o tratamento térmico e melhora as propriedades de conformação mecânica. Os aços ao boro não são empregados só onde se exijam especificações severas de temperabilidade, mas também onde se necessite de características uniformes de tratamento térmico, de usinabilidade, soldagem e conformação. O percentual de boro adicionado aos aços pode variar desde 0,0005%, quando se deseja obter efeitos de temperabilidade, a até 0,0015%, quando se obtêm a melhor combinação de resistência e tenacidade nos aços.
- i) Níquel (Ni) – Refina o grão, diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço. Influencia nas propriedades com o aumento da resistência a tração e com a alta ductilidade.

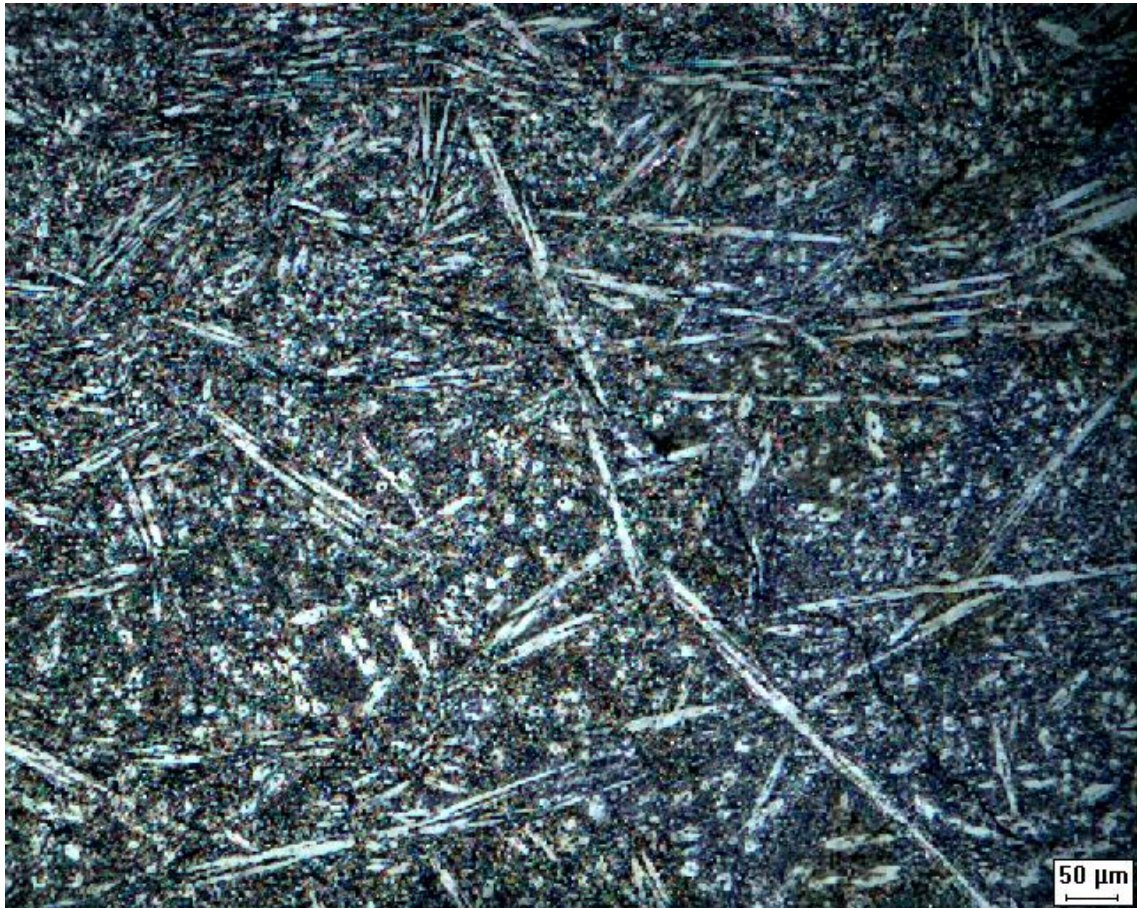


Figura 4.9 - Microestrutura eutética com presença de carbetos complexos de cromo do tipo M_7C_3 . Ataque colorido. 200X

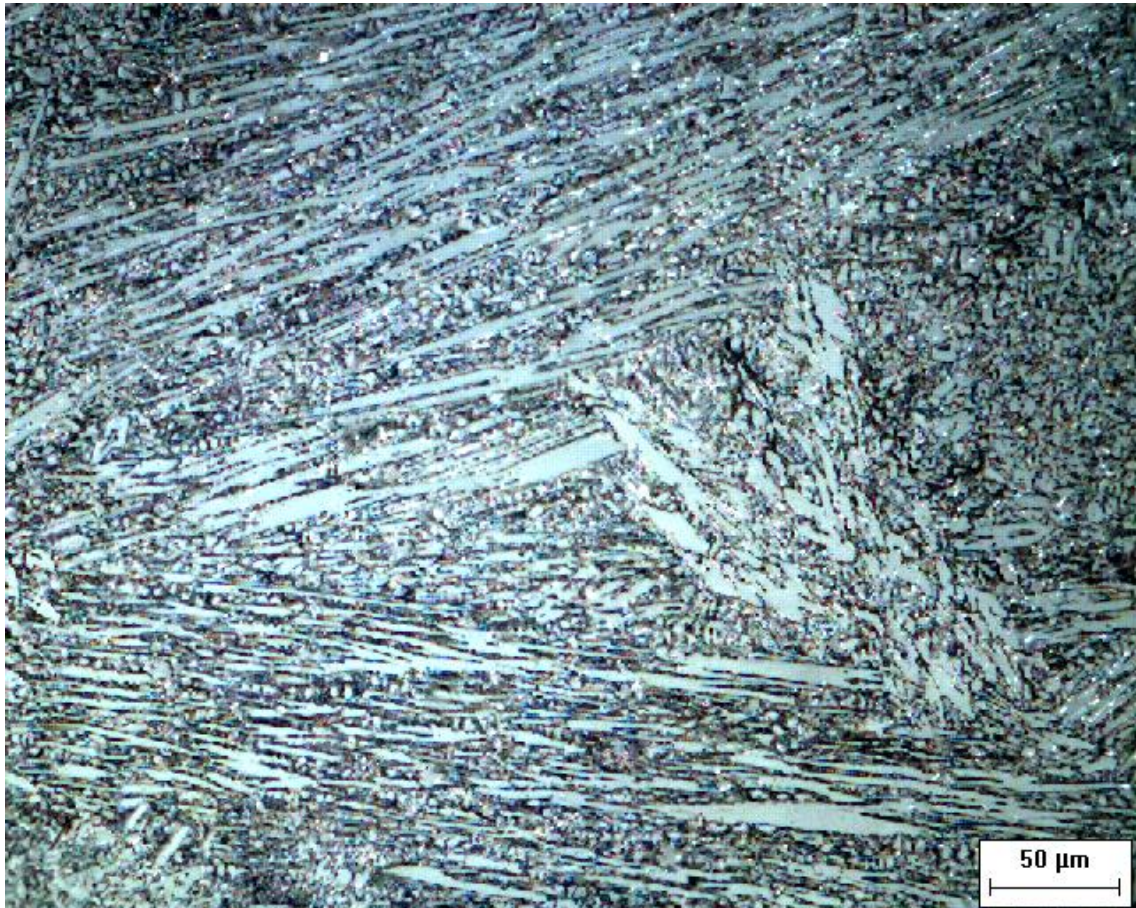


Figura 4.10 - Microestrutura eutética com presença de carbeto complexo de cromo do tipo M_7C_3 . Ataque colorido. 500X.

Os corpos de prova estudados e que foram revestidos pelo processo de soldagem de revestimento, foram incluídos no diagrama de equilíbrio Fe-Cr-C apresentado na Figura 4.11. Observou-se que todas as amostras estão enquadradas na região hipereutética.

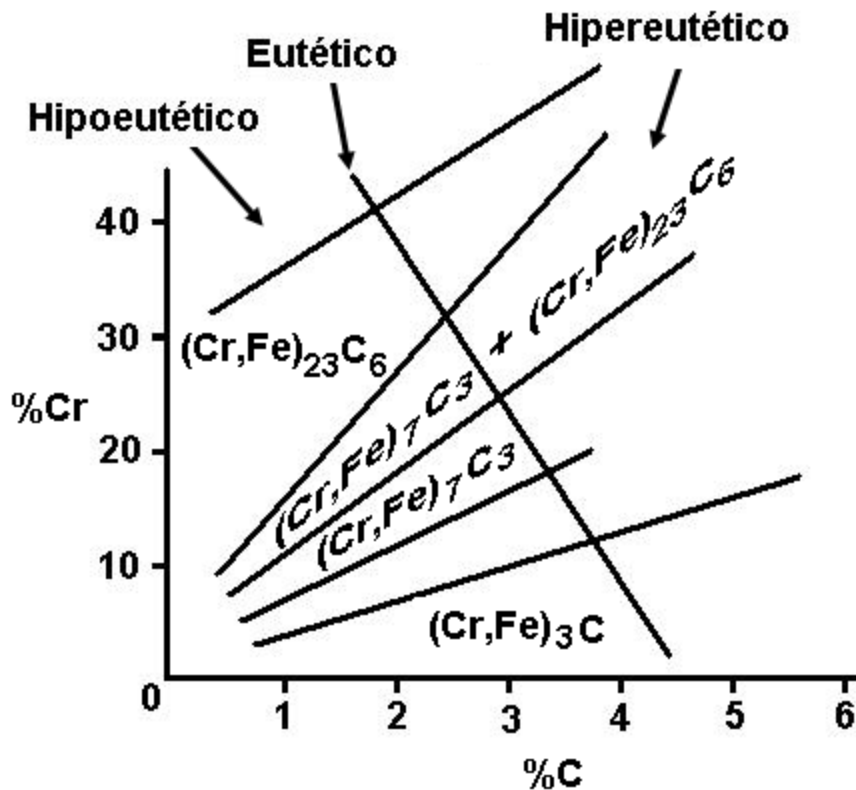


Figura 4.11 – Diagrama de equilíbrio Fe-Cr-C.

As amostras das Figuras 4.9 e 4.10 apresentam uma microestrutura com eutético e perfis alongados de tonalidade clara representando os carbeto complexos de cromo do tipo M_7C_3 e ainda pontos claros representativos dos elementos constituintes da liga de composição do eletrodo, bem como os carbonetos de cromo que não se desenvolveram.

Os perfis representativos dos carbonetos de complexos de cromo M_7C_3 de forma alongada conferem ao revestimento uma dureza elevada que favorece a uma maior resistência ao desgaste abrasivo, porém da mesma forma que elevam esta resistência ao desgaste favorece também o aparecimento de trincas que podem acelerar o processo abrasivo em função de permitir a penetração do grão abrasivo entre as frestas dessas trincas.

4.6.3 Resultados

Apresentar uma análise comparativa de rendimento entre as ferramentas de penetração no solo para equipamentos rodoviários encontrados no mercado consumidor e destas mesmas ferramentas revestidas superficialmente, pelos processos de endurecimento superficial por soldagem, com a utilização de eletrodos revestidos e pela técnica de revestimento LVOF.

Nas análises econômicas efetuadas se constatou que, o custo para se revestir as unhas das caçambas da pá carregadeira, utilizando como base a peça original, isto é, antes da mesma ser colocada em operação, é compatível com o custo benefício de se substituir a mesma unha após o seu desgaste natural. Baseado no preposto, e considerando o tempo desperdiçado para a substituição do elemento, consideramos economicamente viável se revestir unhas de caçamba na condição nova adquirida no mercado.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

5 – Conclusões

– Os materiais revestidos pelo processo de aspersão térmica apresentaram uma superfície mais uniforme e de melhor aparência.

– Como determinadas ferramentas de penetração no solo de equipamentos rodoviários não requerem uma usinagem posterior para acabamento, como retificação, os processos por aspersão, em determinadas situações, são, industrialmente, mais eficientes que os processos por soldagem.

– A perda de volume constatada nos dois processos envolvidos na análise, no quesito correspondente à resistência ao desgaste por aspersão e por soldagem, não se tornou fator determinante na opção de escolha do processo mais eficiente, em função do procedimento utilizado no ensaio de desgaste por abrasão.

- As amostras revestidas pelo processo de soldagem com eletrodo revestido apresentaram trincas em diversos pontos da estrutura, em função do aparecimento dos elementos de segunda fase.

– Ainda não se recomenda revestir ferramentas de penetração no solo de equipamentos rodoviários que estão sujeitos a grandes impactos pelo processo de aspersão térmica, em função dos revestimentos por aspersão não resistirem ao impacto, que também vem a ser uma característica dos dentes de caçamba de pás carregadeiras que sofrem desgaste por goivagem.

Referências

Referências

- AL RUBAIE, K. S., YOSHIMURA, H. N., MELLO, J. D. B., **Two body abrasive wear of Al – SiC composites**, Wear abrasive, nº 233, 1999, p. 444-445.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STADARD. - **American Society for testing and Materials. V-3**. Philadelphia, Pa.1991.
- ATKINS, A. G.,MAY, Y. W., **Elastic and plastic fracture**, Chichester: Ellis Horwood, 1985, p.529-536.
- BAPTISTA, A. L. DE B., NASCIMENTO, I. DE A. DO – **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas**. Rio de Janeiro, www.spectru.com.br.
- BARREIRA, R., LIMA, C. R. C., **Influência da preparação superficial sobre as propriedades de adesão de revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica**, São Paulo.
- BRANDIM, AYRTON DE SÁ, **Influência da adição de pó metálico em soldas de revestimento do tipo Fe-C-Cr depositadas por arco submerso**. UFSCar, 1998.
- BRISCOE, B. J., ADAMS, M. J., **Tribology in particulate tecnology**, IOP Publishing Ltd, 1987, p. 319334, ISBN 0-85274-425-0.
- CATAI, R. E., FRANÇA, T. V., FUSSE, R. Y., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., SILVA, L. R., **A influência dos mecanismos de desgaste abrasivo no processo tribológico dos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos**.
- DESGUPTA, R., THAKUR, R., YADAV, M.S., JHA, A. K., **High stress abrasive wear behaviour of a hardfacing alloy: effects of some experimental factors**, Wear Magazine, nº 251, 2001, p. 908-915.

- DEUIS, R. L., SUBRAMANIAN, C., YELLUP, J. M., **Abrasive wear of aluminium composites – a review**, Wear abrasive, nº 201, 1996, p.132-144.
- FUSSÉ, R. Y. , CATAI, R. E. , FRANÇA, T. V., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., SILVA, L. R., **Análise da influência do desgaste abrasivo em materiais metálicos variando-se dureza, temperatura e velocidade de corte.**
- FUSSÉ, R. Y. ET AL – **Análise da influência do desgaste abrasivo em materiais metálicos variando-se dureza, temperatura e velocidade de corte.** São Paulo.
- GAHR, K. H. Z., **Microstructure and wear of materials.** Tribology series, v10 Amsterdam Elsevier, 1987, p.566.
- GANT, A. J., GEE, M. G., **Wear of tungsten carbide-cobalt hardmetals and hot isostatically pressed high speed steels under dry abrasive conditions**, Wear magazine, nº 251, 2001, p. 908-915.
- GREGOLIN, J. A. – **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) resistente ao desgaste.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 1990.
- HAWK, J. A., WILSON, R. D., TYLCZAK J. H., DOGAN, O. N., “ **Laboratory abrasive wear tests: Investigation of test methods and alloy correlation**”, wear abrasive, Nº 225-229, 1999, p. 1031-1042.
- HUTCHINGS, I. M., **TRIBOLOGY: Friction and Wear of Engineering Materials**, USA, 1992, 273 pp., ISBN 08493-7764-1.
- KESTENBACK, H. J. E GALLEGO, J., **Fontes de endurecimento por precipitação em aços microligados para tiras a quente**, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14., 2000, São Pedro – SP, Anais.
- LIMA, C. R. C. E CAMARGO, F., **Estudo e caracterização de revestimentos para desgaste aplicados por aspersão térmica à chama oxcombustível de alta velocidade –**

HVOF, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 02 a 04 de abril de 2001 – Curitiba – Brasil.

LIMA, C. R. C., CAMARGO, F., **Estudo e caracterização de revestimentos para desgaste aplicados por aspersão térmica a chama oxicom bustível de alta velocidade – HVOF**, 1º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 02 a 04 de abril de 2001 – Curitiba – Paraná – Brasil.

LIMA, C. R. C., CAMARGO, F., MARQUES, P. V., **Estudo comparativo das propriedades de revestimentos a base de cobalto (stellite) aplicados por soldagem e por aspersão térmica**, XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem, Fortaleza – Ce, De 20 a 23 de setembro de 1998.

MARQUES, P. V., **Aspersão Térmica**, <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol105.pdf>.

MONDAL, D. P., DAS, S. JHA, A. K., YEGNESWARAN, A. H., **Abrasive wear of alloy – Al₂O₃ particle composite: a study on the combined affect of load and size of abrasive**, nº 223, 1998, p. 131-138.

PASCOALI, S., **Apostila Introdução ao Desgaste Abrasivo**. Departamento de Engenharia de Materiais, UFSc, 2004.

POLIDO, R. S., GALLEGO J. – **Estudo da microestrutura de revestimento duro aplicado nos equipamentos da indústria sucroalcooleira sujeito ao desgaste abrasivo**. Rio de Janeiro, 2004.

POSSAMAI, L., TAKIMI A., BERGMANN, C. P., **Revestimentos depositados por aspersão térmica hipersônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro**, www.infomet.com.br/artigos/c... 8/3/2007.

RIBEIRO, RUBENS, VENTRELLA, V. A, GALLEGO, JUNO, **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria**

sucroalcooleira, trabalho apresentado no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – 25 a 28 de julho de 2005 – Belo Horizonte-MG.

SOUZA, A., LABONI, A. E COUTINHO, Í., **Revestimentos superficiais – “Tecnologia de superfícies” – Aplicação de cromo duro em ferramentas, moldes e matrizes**, 1º Encontro de Integrantes da Cadeira Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes – 28/10/03 a 30/10/03 em São Paulo – SP.

SOUZA, R. C., **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com WC-12Co, WC-17Co, WC-10Co-4Cr e WC-10Ni pelo sistema HVOF/HP**, Tese de Doutorado, Lorena – SP, Brasil, set. 2002.

Standard practice for conducting dry sand, rubber wheel abrasion tests. In: Annual book of ASTM standards, ASTM. Philadelphia. USA Designação Standard G65.231-243p. 1991. In: referência (19).

STOETERAU, R. L., **Apostila Tribologia**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004/01.

WU, W. Z., XING, J. D., SU, J. Y., **An investigation on three-body abrasive wear test at elevated temperature**, Wear Magazine, nº 210, 1997, p. 299-303.

YUHARA, D. A., **Aplicação de revestimento PVD em ferramentas de corte**, BRASIMET, <http://www.brasimet.com.br>