

## REVESTIMENTOS PROTETORES

### 1. Introdução.

É de fundamental importância selecionar o sistema para depositar o revestimento protetor apropriado em função do mecanismo de desgaste presente. Por conseguinte, a determinação de dito mecanismo de forma adequada converte-se no ponto mais importante do problema.

O diagnóstico certo implicará a seleção de um revestimento apropriado. Na prática, os fenômenos de desgaste se apresentam combinados, como por exemplo, erosão/corrosão/cavitação, portanto, é fundamental a identificação do tipo de desgaste primário e secundário e os mecanismos que atuam mais fortemente, considerando o ambiente de operação.

Do ponto de vista da Tecnologia de Tratamento de Superfície analisaremos a continuação alguns materiais destacando-se atributos de resistência aos diferentes mecanismos de desgaste.

### 2. Ligas Metálicas base Ferro:

2.1. **Materiais ferrosos de baixa liga.** As ligas deste tipo se caracterizam por ser as de menor custo e a maioria encontram-se na forma de eletrodos. Se utilizam em aplicações estruturais, maquinaria de movimento de terra e como camadas base para as aplicações de revestimentos de maior custo. Sua composição química caracteriza-se por conter: Cr entre 1 a 5%, C entre 0.20 a 1.00%, e outros elementos tais como Mo, Mn, Ni e W, em pequenas porcentagens.

É possível obter elevadas durezas, até 55 Rc e com boa tenacidade, o que as faz apropriadas em aquelas aplicações expostas a impacto severo.

Dependendo de sua composição, principalmente dos teores de carbono e cromo, os materiais respondem em geral a tratamento térmico, portanto, pode-se obter uma ampla gama de dureza e de propriedades mecânicas. Por exemplo, ao recuperar por soldagem os dentes de um engrenagem de dureza original 55Rc, é possível utilizar um eletrodo de baixa liga, que contém 2% Cr, 1% de Mo e 0.6% de carbono, ademais de Mn. Obtendo-se um depósito que posteriormente é submetido a tratamento térmico de recozimento, usinagem e posterior tempera, para obter a dureza final adequada.

2.2. **Materiais de alta liga.** A principal diferença com o grupo acima indicado está nos conteúdos de cromo (10 a 40 %) e carbono (2 a 4 %). Isto possibilita a formação de microconstituintes duros, principalmente carbonetos de cromo, responsáveis pela elevada resistência ao desgaste e adequada resistência à corrosão. É normal encontrar nestas ligas adições de Mo, W, Ni e Mn. A dureza destas ligas de alto cromo/alto carbono varia entre 55Rc e 70Rc. Onde sua utilização é mais efetiva na proteção de maquinaria de movimento de terra, eixos transportadores, ventiladores, exaustores, e em geral em componentes expostos a desgaste por abrasão e desgaste por erosão.

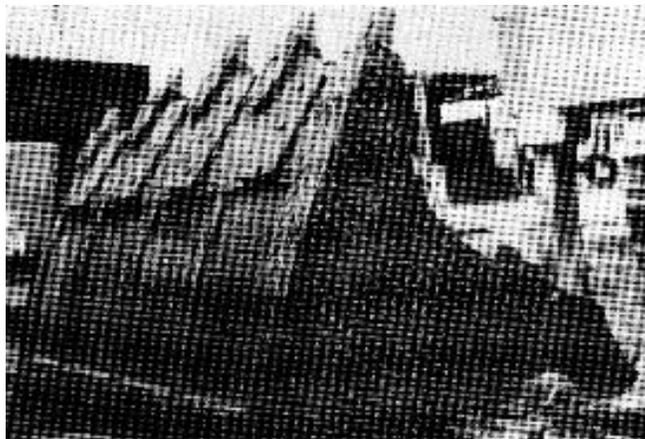


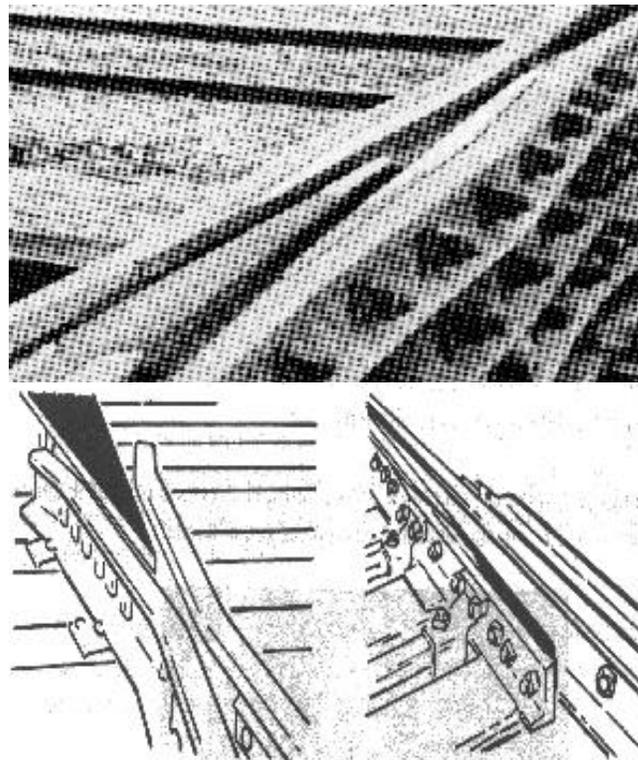
Figura 1. Pá de escavadeira protegida com liga de elevado teor de cromo e carbono.

Estas ligas também podem ter características refratárias (pelo elevado teor de cromo), pelo que podem ser utilizadas para a proteção de partes e componentes submetidas a mecanismos de desgaste abrasivo a quente, como é o caso em partes e peças de uma fundição ou nos convertidores de materiais fundidos.

- 2.3. **Materiais ao Manganês.** Este tipo de material tem propriedades de elevada resistência ao desgaste, utilizado em grande escala em atividades mineiras. Este tipo de aço também é conhecido como aços Hadfield, e são ligas contendo carbono entre 1.0 e 1.4 % e de manganês entre 10 e 15 % (C:Mn = 1:10). O % de manganês na liga retarda a transformação da austenita, a que é retida a temperatura ambiente através de resfriamento brusco durante sua manufatura. Portanto, ao conservar a estrutura austenítica a frio, este aço mantém as propriedades de dita fase (aço não magnético e endurece por deformação plástica). Pelo fato de ter elevado teor de carbono, seu endurecimento é bastante mais pronunciado que o produzido em outras estruturas austeníticas, como as dos aços inoxidáveis tipo AISI 316.

A dureza inicial de um depósito de aço ao manganês, depositado através de arco elétrico é de 15Rc a 25Rc, submetido posteriormente a impacto severo (após deformação plástica) este material atinge dureza na faixa de 50Rc até 55Rc.

Comparativamente, na prática os aços ao carbono ligados possuem quase a mesma resistência que os aços ao Mn, sendo que os aços ao Mn tem até 45% de elongação contra só 15% dos aços ao carbono ligados, por conseguinte, os aços ao manganês tem maior tenacidade. A seleção de aços ao manganês é apropriada como revestimentos de componentes submetidos a impacto e abrasão, tipos de desgaste sempre presentes nas atividades de mineração. É importante lembrar que a utilização desta liga requer que atue o mecanismo de desgaste por impacto para produzir a deformação plástica requerida para seu endurecimento. De ser inadequadamente selecionada a liga atuara como se for um aço 1030, desgastando-se rapidamente si a dureza do elemento abrasivo for elevada. Uma outra aplicação desta liga é na recuperação de cruzamento de trens, como é observado na figura 2.



**Figura 2.** Recuperação de trilhas ferroviárias com depósitos de Mn.

### 3. Ligas não Ferrosas.

Estas ligas também conhecidas como superligas são ligas desenvolvidas para manter elevada resistência (fadiga e ruptura) a elevadas temperaturas. Estas ligas complexas tem também boa resistência à corrosão e oxidação. Em geral existem três superligas:

- Base Níquel
- Base Níquel ferro
- Base Cobalto.

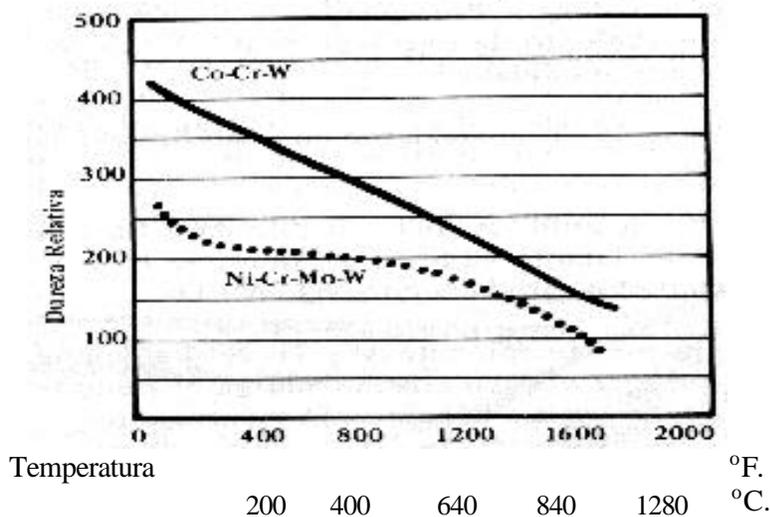
3.1. **Ligas base Níquel.** O desenvolvimento destas ligas esta vinculada à necessidade de contar com materiais com características termoresistentes. Por exemplo, o desenvolvimento de turbinas aeronáuticas com maior resistência à fadiga que os aços inoxidáveis.

As ligas mais conhecidas são as ligas Nimonic 75 e Nimonic 80, esta última por exemplo contém 20% de Cr, adições de 2,5% de Ti e 1% de Al, permitindo a formação de precipitados do tipo  $Ni_3(Al,Ti)$ . A precipitação de Al e Ti permite o endurecimento por envelhecimento, portanto, é possível a obtenção de elevada dureza e excelente resistência à oxidação e corrosão.

3.2. Liga base Ni-Fe. Nesta superliga o ferro substitui parte do níquel (por razões de economia). Por esta razão esta superliga não pode ser utilizada a temperaturas muito elevadas. A maioria destas superligas contém de 25 a 45% de Ni e 15 até 60% de Fe, é adicionado Cr entre 15 a 28% para fornecer resistência à oxidação a elevadas temperaturas. Também encontra-se adições de Mo (1 a 1.6%) e Ti, Al e Nb, adicionados para combinar-se com o Ni e formar precipitados endurecedores.

3.3. Ligas base Cobalto. Neste grupo classifica-se os revestimentos que tem Cobalto, Cromo e Tungstênio. Caracterizam-se por manter a dureza a elevadas temperaturas.

Existem variadas composições de superligas, onde a faixa de dureza varia de 40Rc até 55Rc. Os revestimento encontram-se na forma de varetas, eletrodos ou como pó para ser aplicado a quente ou a frio. Na figura 3 observa-se curvas comparativas das superligas base Co-Cr-W e Ni-Cr-Mo-W.



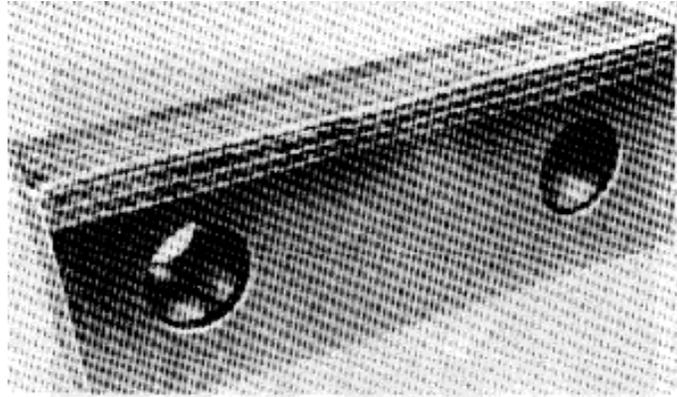
**Figura 3.** Dureza a quente para as superligas base Ni e base Co.

A microestrutura deste grupo de superligas não ferrosas consiste de uma matriz de cobalto ou níquel, na qual encontra-se em solução sólida carbonetos de cromo e tungstênio. O carbono se encontra na faixa de 0.5% até 2.5% e sua presença é fundamental para a formação de carbonetos.

Em geral as superligas base cobalto são mais resistentes à corrosão a quente que as de base níquel, mais exibem menor resistência à oxidação.

Quanto a resistência mecânica, as superligas base Co não são capazes de manter elevada resistência à ruptura como as com base Ni, quando submetidas por algum tempo a elevada temperatura. Portanto, só se utilizam em elementos pouco solicitados termicamente.

As aplicações fundamentais dos revestimentos base Co (Ni) – W – Cr, encontram-se em aquelas partes e componentes expostas a elevadas temperaturas, abrasão e erosão. Também, são utilizadas em componentes de forja, já que a matriz de cobalto tem elevada tenacidade. Outra aplicação é na recuperação de facas de corte a quente na indústria siderúrgica (figura 4).



**Figura 4.** Faca de corte a quente recuperada com a superliga Co-Cr-W.

#### **4. Ligas de carbonetos complexos.**

Estas ligas são conhecidas como o grupo que em algumas aplicações podem substituir ao diamante, sua dureza varia de 8.5 a 9.5 na escala Mohs (diamante tem dureza 10 Mohs). Este grupo esta composto por carbonetos de tungstênio, vanádio, titânio, boretos, etc., sendo o mais utilizado o carboneto de tungstênio.

Os carbonetos encontram-se disponíveis para ser aplicados em vareta para ser depositados pelo processo a chama oxi-gás (com e sem cladding), arco elétrico tubular, pó (plasma e aspersão térmica) ou na forma de insertos.

Estas ligas complexas oferecem elevadas resistência à abrasão de baixo esforço. A tenacidade dos carbonetos é quase nula. Sua resistência aos outros graus de abrasão fica definida pelas características da matriz na qual encontram-se depositadas. Por exemplo, quando se deseja uma matriz tenaz, o processo de deposição oxi-gás é adequado e aplica-se com êxito nas brocas de perfuração (figura 5). Porém, não só é importante ter a presença de carbonetos de tungstênio, mais é fundamental uma ótima combinação de tamanho e distribuição dos carbonetos, além relação entre matriz e carbonetos.



**Figura 5.** Bits de brocas de perfuração revestidos com WC através do processo a chama oxi-gás.

## 5. Aplicação de revestimentos protetores.

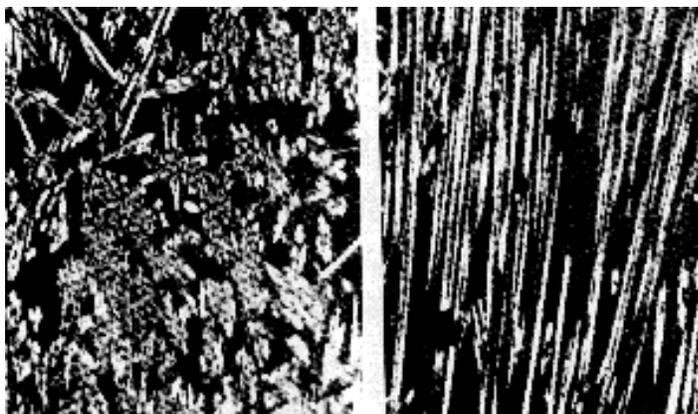
Para obter superfícies com elevada resistência ao desgaste são utilizados materiais de elevada dureza, geralmente correspondem a uma matriz ferrosa, de níquel ou de cobalto, na quais ficam as fases duras de diversos carbonetos, boretos, carbonitretos e outros, os quais são responsáveis pela elevada dureza e resistência à abrasão. Os carbonetos utilizados são do tipo WC, CrC e carboneto de ferro, indicados em escala descendente de dureza. Como matriz para os carbonetos de tungstênio normalmente é utilizada matriz de níquel, cobre ou ligas com elevado teor de ferro. Os carbonetos de cromo tem fundamentalmente matriz de ferro ou cobalto.

Em geral, a resistência ao desgaste abrasivo aumenta com a dureza, porem a resistência, depende do tamanho, orientação, forma e densidade das fases duras, e principalmente do procedimento de deposição dos revestimentos protetores. Por exemplo, uma liga com matriz de Ni e fase dura de WC pode depositar-se através do processo a chama oxi-gás (vareta ou pó), também pode utilizar-se eletrodos e realizar o deposito através do processo com arco elétrico convencional ou pela utilização de pó com arco plasma ou aspersão térmica. No caso da aplicação de arco elétrico parte dos carbonetos podem-se dissolver e no arco voltaico reduzir o % de carbono (descarbonetação por CO ou CO<sub>2</sub>), portanto, a estrutura ficara com menor dureza. Por outro lado, ao utilizar um processo que requer menor temperatura como o processo oxi-gás, a perda de carbono é menor, retendo a estrutura maior quantidade de fases duras.

Isto é uma clara demonstração que ainda pode ser otimizada a deposição destes revestimentos duros complexos, resta conhecer como através de outros processo podem ser minimizadas as perdas de carbono ou a dissolução dos carbonetos, neste aspecto existem os processos que tem como principio de deposição o plasma e a aspersão térmica, processos que apresentam algumas vantagens respeito dos processos mais tradicionais.

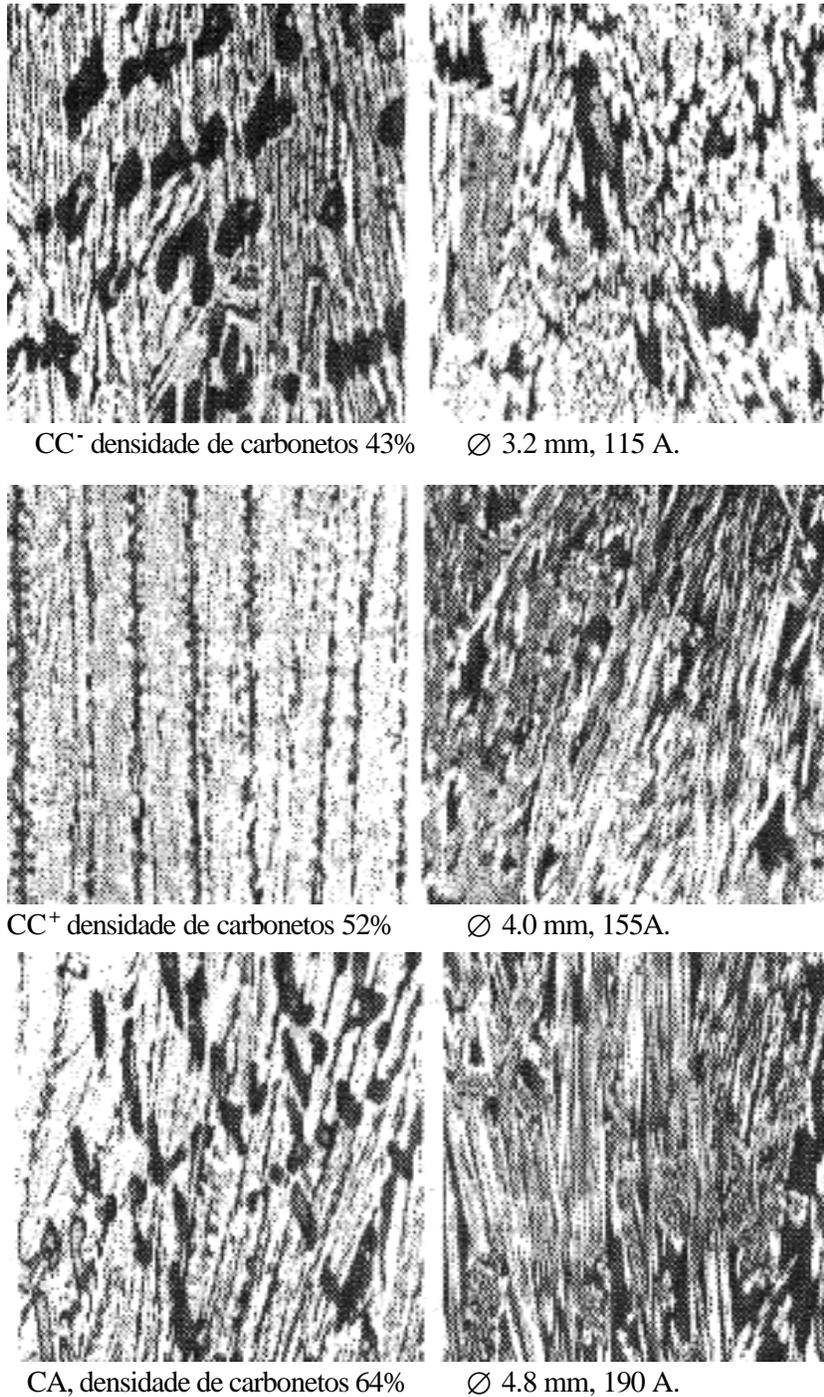
O caso da seleção de que microestrutura deve de ter uma liga de Ni – WC para a proteção de um ventilador – exaustor contra o desgaste erosivo de partículas muito finas que chocam nos álabes a elevada velocidade: Em ambos casos se requer uma matriz com elevada elasticidade, tal que permita absorver a energia de impacto que transferem as partículas finas e que atuam através do desgaste erosivo com ângulos entre 45° e 90° . Por conseguinte uma estrutura com maior quantidade de matriz exposta proporciona menor resistência ao desgaste erosivo que uma matriz com grande densidade de carbonetos. Resta avaliar através de que processo e procedimento podem ser obtidos revestimentos densos e de levada resistência ao desgaste erosivo.

A figura 6 apresenta dois estruturas de metal depositado de composição de 5% de C e 35% de Cr e foram depositado com eletrodo de 4mm de Ø. As microestruturas mostram depósitos realizados com 130 A e 160 A. O revestimento depositado com menor corrente apresenta uma grande quantidade e densidade de carbonetos de pequenas dimensões. No outro em cambio, os carbonetos apresentam-se de maneira completamente distinta, ficando mais exposta a matriz.



**Figura 6.** Microestrutura de revestimentos depositados por arco elétrico com eletrodo de 4mm de Ø. A) corrente 130 A e B) corrente 160 A. Ataque reativo Marble. 50x.

A figura 7 mostra os efeitos produzidos para a mesma liga Fe-Cr-C, ao variar o tipo de corrente e  $\varnothing$  do eletrodo.

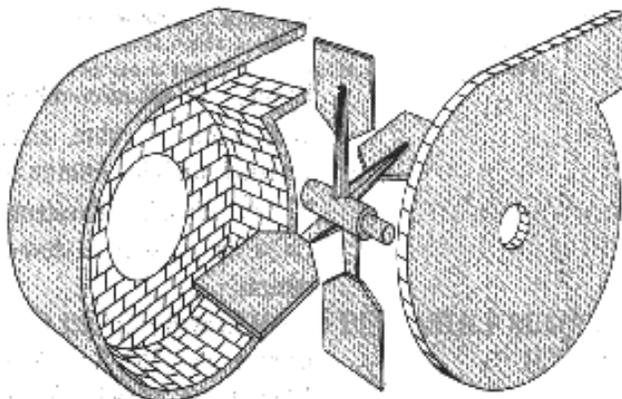


**Figura 7.** Microestrutura de depósitos realizados com eletrodo de 3.5% de C, 9.0% de Cr.

Destas microestruturas pode-se deduzir o efeito da polaridade,  $\varnothing$  de eletrodo e corrente de soldagem, ficando evidente as mudanças na densidade dos carbonetos de cromo na matriz de Fe-Cr-C. Neste caso, é também importante avaliar o procedimento de deposição, considerando a diluição e velocidade de soldagem, principalmente se a soldagem é multipasse.

## 6. Revestimentos Protetores Cerâmicos.

Focalizaremos nosso estudo dos materiais cerâmicos resistente ao desgaste, analisando a utilização de uma serie de óxidos metálicos, utilizados na forma de pó, como revestimentos de partes e componentes. Os materiais cerâmicos são diversos, existem desde os compostos de argila e cimento até as cerâmicas modernas como são os materiais para raios laser (titanáto de bário), e em geral todos os materiais inorgânicos não metálicos. Destaca-se a utilização da alumina –  $Al_2O_3$  sinterizada em forma de tijolo, a que requer de adesivo epóxico para aderir ao metal de base e entre os tijolos. Um exemplo típico de aplicação o constitui o revestimento de chutes de descarga e ductos, onde a cerâmica tem demonstrado ser adequada com relação aos revestimentos tradicionais de caucho. Um exemplo deste tipo de aplicação observa-se na fig. 8.



**Figura 8.** Revestimentos cerâmico de  $Al_2O_3$  para proteger a caixa de ventilação contra a erosão.

Os revestimentos cerâmicos na forma de pó caracterizam-se por ter variada dureza, de 25RC até 65RC, resistentes à corrosão e ao calor, assim como também em condições erosivas a elevadas temperaturas ou abrasão em meios corrosivos. A deposição destes tipo de revestimentos pode ser efetuada através dos processos de aspersão de elevada energia térmica como o plasma ou de elevada energia de impacto (HVOF).

## 7. Principais características de pós de maior utilização na aspersão térmica [tabela 1].

**Tabela 1.** Principais Características de Ligas Metálicas.

Pós	Principais Características	Dureza
Aço de baixa liga	Geralmente utilizado na restituição dimensional	--
Aços eutetoide	Revestimento de boa resistência ao desgaste abrasivo. Boa usinagem	38Rc
Aço inox AISI 316	Boa resistência à corrosão. Excelente usinagem	90Rb
Aço inox AISI 410	Boa resistência à corrosão e erosão. Recuperação de turbinas hidráulicas	35Rc
90%Ni/10%Al	Liga exotérmica, utilizada como camada de ligação	80Rb
Ni-Cr-Mo-Al	Liga exotérmica de boa resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo.	30Rc
90%Cu/10%Al	Liga tipo bronze/Alumínio	60Rb
5%Ni/5%Al/Mo Alumínio	Boa resistência à erosão por partículas finas Resistente à corrosão marinha e atmosférica.. Excelente condutividade elétrica. Barreira para a radio frequência.	80Rb --
Al/10%Si	Inferior resistência à corrosão que o Al puro, mais tem maior dureza .	--
Zinco	Resistente à corrosão atmosférica e marinho.	--
Cobre	Depósitos utilizados como condutores	--

**Tabela 2.** Principais características das ligas cerâmicas.

Pós	Características
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dureza de 65Rc. Resiste até 500 °C. Excelente resistência à corrosão e erosão.
TiO <sub>2</sub>	Dureza de 58Rc, temperatura máx de trabalho 500 °C. Revestimento denso e resistente à abrasão.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub> (60/30)	Dureza de 60Rc. Resiste até 1100 °C. Revestimento denso, de boa resistência à corrosão, abrasão e erosão.
MgZrO <sub>2</sub>	Dureza de 20Rc. Oferece proteção contra o cobre, zinco, alumínio e ferro fundido. Resiste até 1350 °C. Excelente resistência à erosão a elevadas temperaturas.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub> (97/3)	Dureza de 55Rc. Resiste até 1000 °C. Resistente à erosão, calor e cavitação. Resiste a ação do zinco, cobre e alumínio fundido.
ZrO <sub>2</sub>	Dureza de 25Rc. Admite até 1600 °C. Excelente como barreira térmica. Resiste à erosão a elevadas temperaturas.

**Tabela 3.** Principais características dos carbonetos.

Pó	Características	Dureza
De W-Ni-Al.	Depósitos densos, resistentes à erosão e temperaturas elevadas.	55Rc
De Cr-Ni-Al	Resistência à oxidação em elevadas temperaturas.	35Rc

**Tabela 4.** Principais característica dos Cermets.

Pó	Características	Dureza
70% NiAl + 30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Depósito resistente à corrosão e abrasão	45Rc
75%Ni + 25% grafito	Depósitos especiais para zonas de selagem em turbinas	90Rb

## 7. Compostos Orgânicos-Metálicos.

Os compostos orgânicos metálicos são polímeros termo - estaveis (termo-rígidos) de dois componentes: Matriz – Reator, os quais se misturam em proporções predeterminadas para produzir o endurecimento do composto (tempo de cura 24 horas). Dependendo de sua composição e aditivos, poderá obter-se uma camada resistente a variados mecanismos de desgaste.

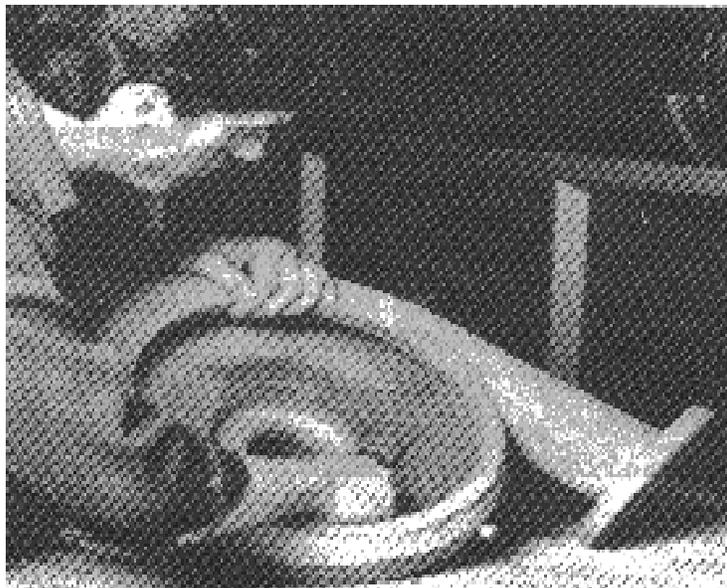
O processo caracteriza-se por não precisar fonte de energia externa para sua aplicação, nem requer pessoal especializado.

Os compostos termo - estaveis tem resistência limitada, dado que são polímeros, são expostos a degradação quando solicitados em meios com elevada temperatura, só são recomendados para serviços a temperaturas inferiores a 100 °C.

As aplicações características são:

- Revestimentos contra o desgaste erosivo tais como em carcassa de bombas e impulsores.
- Selagem de fuga em câmaras de água de motores.
- Restauração dimensional de componentes.
- Reparação de tanques de gasolina
- Carburadores
- Câster de carro
- Motores elétricos

Na figura 9 pode-se observar algumas aplicações.



**Figura 9.** Aplicação dos compostos termo-estáveis.

Com relação ao comportamento frente a diversos meios químicos, na seguinte tabela pode-se observar sua característica em alguns meios corrosivos químicos.

**Tabela 5.** Comportamento do composto Orgânico Metálico Termo-estável em alguns meios corrosivos químicos.

Meio corrosivo químico	Característica
Acido acético	Não recomendável
Cloreto de Alumínio	Recomendável
Sulfato de Amônio	Recomendável
Sulfato de cobre	Recomendável
Cloreto de calcio	Recomendável
Álcool Etilico	Recomendável
Gasolina	Recomendável
Metanol	Recomendável
Acido fosfórico (até 50%)	Recomendável
Ácido fosfórico (sobre 50%)	Não Recomendável
Ácido sulfúrico (até 10%)	Recomendável
Acido sulfúrico (entre 10% e 75%)	Recomendável a temperatura ambiente
Ácido sulfúrico (sobre 75%)	Não Recomendável

## 8. Comparação entre os processos de aspersão térmica de maior uso industrial na aplicação de revestimentos protetores.

### 8.1. Processo Flame Spray:

#### Vantagens

- pode utilizar todos os materiais possíveis de ser fabricados como arames
- fácil manuseio
- custo operacional reduzido
- custo do arame em geral menor
- custo de aquisição e instalação do equipamento baixo

- pistola portátil

#### Desvantagens

- pistola submetida a desgaste
- camadas de menor aderência quando comparados com outros processos mais modernos
- camadas com alto teor de porosidade
- requer de preaquecimento do substrato para obter elevada aderência

### **8.2. Processo Thermo Spray:**

#### Vantagens

- pode utilizar a maioria dos materiais fabricados na forma de pó
- menor consumo de gases
- equipamento mais leve e portátil
- quando a camada é submetida a refusão posterior a camada obtém aderência elevada

#### Desvantagens

- custo do pó mais elevado
- aplicação mais difícil
- revestimentos porosos
- necessário armazenamento dos pó especiais
- necessário de controle da temperatura durante a deposição.
- requer de preaquecimento do substrato para obter adequada aderência

### **8.3. Processo por arco elétrico:**

#### Vantagens

- pode utilizar todos os materiais possíveis de ser fabricados como arames
- processo de maior taxa de deposição
- preparação da superfície não sempre rigorosa
- revestimentos de elevada aderência
- revestimentos com camadas de óxidos estáveis

#### Desvantagens

- equipamento de difícil manuseio
- camadas com elevado teor de óxidos

### **8.4. Processo Plasma:**

#### Vantagens

- pode utilizar pó ou arame
- elevada velocidade de deposição
- excelente controle da diluição
- excelente acabamento superficial

#### Desvantagens

- equipamento fixo de difícil manuseio
- alto consumo de energia
- alto nível de ruído (+120 db)
- deve ter controle da temperatura entre as acamadas depositadas
- elevado custo do equipamento

### **8.5. Processo a chama HVOF:**

#### Vantagens

- camadas de elevada aderência
- utiliza pó de revestimento
- camadas de mínima porosidade

#### Desvantagens

- equipamento de elevado custo
- alto nível de ruído (+120db)
- equipamento de difícil manuseio
- elevado consumo de gases