

# Avaliação da aplicação de recobrimento metálico amorfo para proteção contra corrosão e desgaste

E. M. Mazzer\*, C. R. M. Afonso

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa)

Caixa Postal 676, CEP 13565-905, São Carlos - SP, Brazil

(Recebido em 20/08/2012; aceito em 22/08/2012)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

## Resumo:

A corrosão e o desgaste são problemas que atingem muitos componentes na indústria gerando um alto custo relacionado. Neste trabalho foram analisadas e comparadas as propriedades de desgaste e corrosão em recobrimentos produzidos através de aspersão térmica: tanto os já comercializados como os presentes apenas na literatura científica à base de ligas ferrosas amorfificáveis.

**Palavras-chave:** Metais amorfos; recobrimentos; aspersão térmica; corrosão; desgaste.

## Abstract:

Corrosion and wear are problems related with many industry equipments that generate a high cost of maintenance. In this work wear and corrosion resistance properties in metallic coatings produced by thermal spray were analyzed and compared in two different context: commercial and advanced ones found in the literature of iron-based amorphous alloys.

**Keywords:** Amorphous metals; coatings; thermal spray; corrosion; wear.

## 1. Introdução

A corrosão é um processo que causa grande impacto na economia nacional. Estima-se que o custo total associado a este fenômeno esteja entre 3 e 4% do PNB, ou seja, entre US\$ 16,5 a 22 bilhões ao ano, no caso do Brasil. Os custos evitáveis giram em torno de US\$ 5 bilhões ao ano. [1]

A indústria petrolífera, por exemplo, enfrenta sérias dificuldades com relação à corrosão de tubos e componentes em geral. O meio explorado geralmente contém alta concentração de íons cloreto, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, além de altas temperaturas e pressões, caracterizando um ambiente severo com condições agressivas de corrosão. [2]

Em muitos casos, as soluções mais comuns contra os processos corrosivos são trocas de equipamentos ou partes, uso de inibidores de corrosão ou utilização de ligas mais nobres, como aços inoxidáveis e superligas de Ni. Muitas vezes, essas soluções possuem alto custo e um desempenho abaixo do ideal, necessitando de soluções alternativas.

Assim, novos estudos e tecnologias estão sendo empregados, visando uma melhoria das propriedades dos componentes, como por exemplo tubulações e dutos. O recobrimento destes com ligas metálicas amorfas se encaixam em uma promissora alternativa para a resistência à corrosão e ao desgaste.

## 2. Comportamento na corrosão de bulks a base de Fe

A corrosão de metais amorfos (com espessura de 20 a 50 µm) tem sido estudada desde 1974, com fitas produzidas por solidificação rápida em aparelho de melt-spinning. Foi reportado na época que a corrosão de fitas amorfas da composição Fe<sub>80-x</sub>Cr<sub>x</sub>P<sub>13</sub>C<sub>7</sub> (%at) possuíam mais resistência à corrosão que ligas cristalinas do sistema Fe-Cr [3]. Outra observação foi a de que era necessário uma quantidade menor de Cr (8%) para atingir a resistência à corrosão quando comparado à quantidade requerida (mais que 12%) em ligas cristalinas. Estudos indicam que a camada passiva de oxid-hidróxido de cromo formada nas ligas amorfas é da mesma natureza da formada em aços inoxidáveis, todavia observa-se que a quantidade de Cr na camada passiva é bem maior nas ligas vítreas do que nos aços inoxidáveis austeníticos. Assim, a camada passiva é apenas um fator para a alta resistência à corrosão das ligas vítreas. Os outros pontos estão associados aos seguintes fatores:

- homogeneidade química, que é obtida pelo processamento de resfriamento rápido, impedindo que haja difusão no estado sólido e partição de soluto;
- ausência de defeitos cristalinos como contornos de grão, discordâncias e precipitação de segunda fase, que podem gerar uma célula galvânica;

\*Email: [ericmazzer@gmail.com](mailto:ericmazzer@gmail.com) (E. M. Mazzer)

• menor quantidade de elementos de liga necessários para formar uma camada passiva, devido ao fato desta se formar uniformemente sobre a superfície de um metal vítreo [3]

A Figura 1 mostra, de modo comparativo, a influência da quantidade de Cr e da concentração de HCl na taxa de corrosão de uma liga cristalina e uma vítrea. Nota-se que a corrosão do metal cristalino é maior nas quantidades de Cr apresentadas. Na Figura 1 b) as taxas de corrosão do metal vítreo são insignificantes [3].

### 3. Recobrimento Metálico por Aspersão Térmica

A técnica de aspersão térmica consiste no depósito em um substrato devidamente preparado utilizando de partículas finamente divididas, sendo estas metálicas ou não, na condição fundida ou semi-fundida, formando uma camada superficial. A energia para a deposição é advinda de uma tocha ou um arco elétrico, aquecendo as partículas e atirando-as sobre o substrato através de um gás comprimido. As camadas formadas possuem estrutura lamelar, com a presença de óxidos e poros. Estas camadas conferem ao material proteção de natureza mecânica (desgaste), química (corrosão) e física (calor e eletricidade).

O material a ser aspergido pode ser fornecido no formato de varetas, pós, arames e cordões. Assim, a técnica pode ser utilizada para metais, óxidos, compostos intermetálicos, cermets (compósito com metais e cerâmica), plásticos e alguns vidros [4, 5].

A estrutura geral de uma camada aspergida termicamente é mostrada na Figura 2 [6]. Pela ilustração é possível observar que a camada é diferente do material original, pois a utilização de oxigênio e o contato com a atmosfera durante o processo podem gerar outros compostos, como óxidos. A densidade do material e a presença de poros dependerá muito da técnica utilizada, da fonte de energia e da velocidade impostas às partículas.

O número de técnicas de aspersão térmica para recobrimento metálico é variado, dependendo do tipo de aplicação requisitado. Elas são classificadas principalmente pela fonte de calor utilizada no processo, podendo ser através de processos elétricos ou por combustão, de uma maneira geral. Os tipos principais de processos de recobrimento e suas siglas são listados como segue:

- FS – Flame Spraying (aspersão a chama oxi-gás com material de adição na forma de pó ou arame);
- HVOF – High Velocity Oxy-Fuel flame spraying (aspersão a chama oxigênio-combustível de alta velocidade com material de adição na forma de pó);
- D-gun – Detonation-Gun spraying (aspersão por detonação);
- TWAS - Twin Wire Arc Spraying (aspersão térmica por arames gêmeos).
- PS – Plasma Spraying (aspersão a plasma);
- AS – Arc Spraying (aspersão a arco elétrico);
- LS – Laser Spraying (aspersão a laser);
- CS – Cold Spraying (aspersão a frio) [7].

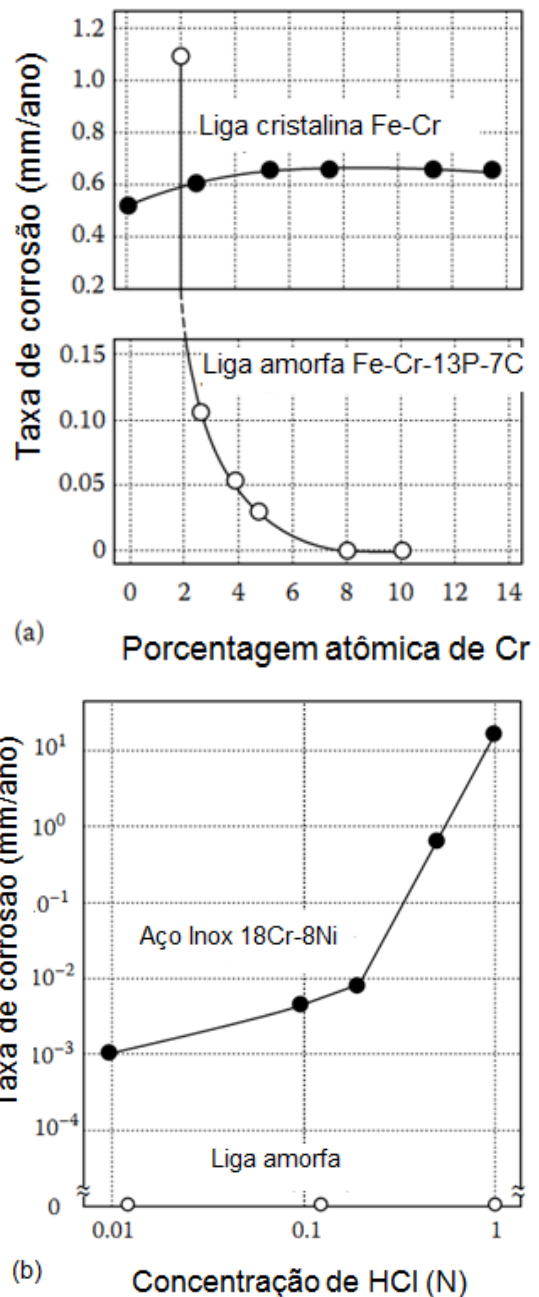


Figura 1. Variação da taxa de corrosão em ligas cristalinas e vítreas com a) a quantidade de Cr e b) concentração de HCl [3]

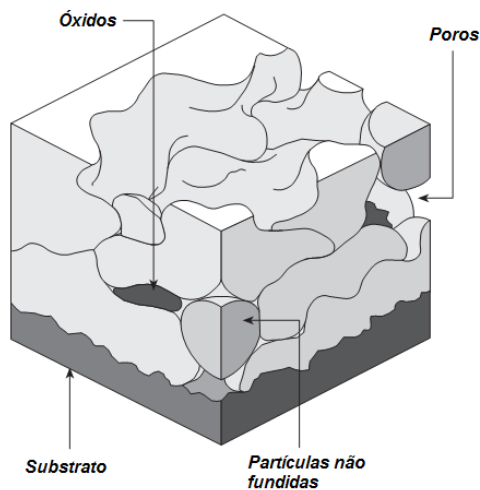


Figura 2. Corte transversal mostrando os constituintes de uma camada aspergida termicamente [6]

Em geral, os processos por combustão utilizam um gás combustível para a geração de calor, com a temperatura chegando a 2760°C. Dentre este tipo de processo encontra-se o HVOF, FS, e HVCW. O processo por detonação (D-gun) ocorre de maneira diferente de outros métodos de combustão. Nesse caso é utilizada a energia de sucessivas explosões de oxiacetileno para impulsionar o pó até a superfície.

Dentre os processos elétricos, o de aspersão a arco elétrico exibe uma atomização realizada por dois arames eletrodos, que se fundirão pela diferença de potencial entre os arames. Um jato de gás acelera o material ao substrato. No processo a plasma são utilizados pós como material de aspersão; o plasma é gerado pela passagem de um gás ou mistura de gases entre arco elétrico formado por um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre [8].

### Aspersão por arco elétrico

Nesse processo de aspersão dois arames eletrodos consumíveis com alimentação automática são postos frente a um jato de gás. Uma diferença de potencial imposta entre esses dois arames gera um arco elétrico, fundindo a ponta dos mesmos, pois a temperatura pode chegar a 4000°C. Um jato de gás atomizante forma um fluxo de gotículas fundidas até o substrato. A alta temperatura das gotas pode provocar regiões com reações químicas e difusão após o impacto com o substrato, gerando interações como se fosse uma solda a ponto, conferindo boa resistência à adesão do recobrimento. [7,8]

A diferença de potencial gerada entre os arames é que definirá o tamanho do arco e das gotículas. Estes fatores devem ser controlados para garantir uma boa densidade e um bom acabamento das camadas. Um exemplo de deste tipo de aspersão é o TWAS.

A Figura 3 ilustra o princípio básico de funcionamento desse processo.

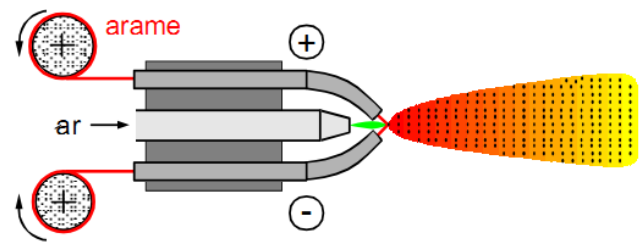


Figura 3. Ilustração de equipamento de aspersão por arco elétrico [8]

### Processo de aspersão por HVOF

A aspersão térmica por HVOF se caracteriza por um fluxo de chama que é formada por combustão a alta pressão, fazendo com que os gases envolvidos atinjam altas velocidades (2000 m/s). Para os equipamentos ditos de “primeira ou segunda geração”, o material de aspersão em forma de pó é injetado por um alimentador pressurizado de modo axial e central no fluxo de gás, onde é aquecido e impulsionado até o substrato. A pressão atingida na combustão varia de 3 a 5 bar e a alta velocidade gerada é fruto da expansão do gás no bico injetor. Nos equipamentos de “terceira geração”, o pó é injetado axial e radialmente, atingindo pressões de 6 a 10 bar na câmara de combustão. O bico de injeção nesse caso é convergente ou divergente (não reto como nos outros equipamentos) fazendo com que o fluxo de gás seja aquecido e acelerado a velocidades supersônicas. Com isso, a velocidade das partículas tem um ganho de 30% a 50%, diminuindo a temperatura atingida no processo. A Figura 4 ilustra um equipamento de HVOF [8].

As grandes vantagens desse estão relacionadas ao fato de os materiais aspergidos não se fundirem e ao menor tempo de voo, gerando camadas mais densas e com uma menor quantidade de poros.

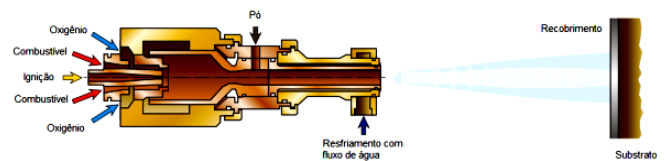


Figura 4. Ilustração do funcionamento básico de um equipamento de HVOF de terceira geração [6]

### Aspersão a plasma

Esse processo é gerado pela passagem de gases através de um elétrico formado por um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre alinhados coaxialmente, que aquecerão os gases e formarão o plasma. O material em forma de pó a ser aspergido é alimentado diretamente no plasma e será dirigida a alta velocidade em direção ao substrato. Os parâmetros que controlarão a energia envolvida, a temperatura e a velocidade do jato estão relacionados ao tipo do bocal constritor, intensidade da corrente elétrica, composição e vazão do

plasma. Normalmente o plasma é constituído por nitrogênio e argônio, podendo ter adições de hidrogênio ou hélio. A Figura 5 mostra o funcionamento básico do equipamento [9].

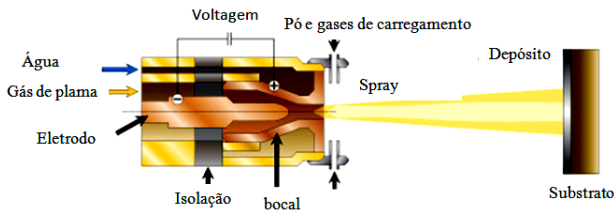


Figura 5: Ilustração do equipamento de aspersão a plasma [11]

### Problemas gerais de corrosão e desgaste na indústria petrolífera

A produção de petróleo e gás, junto com seu transporte e refino, apresentam sérios problemas de corrosão e desgaste ao longo de sua cadeia. Os custos diretos e indiretos relacionados com esses problemas são altos, porém podem ser minimizados com a utilização de materiais de melhor desempenho, evitando custos de manutenção que, por sua vez, agregam altos valores.

O petróleo e o gás caracterizam um meio muito agressivo com relação à corrosão pela presença de compostos como gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), polissulfetos, ácidos orgânicos e elementos sulfurados. Na produção de petróleo em campos maduros os equipamentos estão também suscetíveis à corrosão pela água produzida. [10]

Exemplos de componentes que sofrem com a corrosão e desgaste são tubulações e dutos de escoamento. Quando há acúmulo de materiais orgânicos e inorgânicos na superfície interna ocorre corrosão e desgaste das paredes, gerando perda de espessura e comprometendo a integridade da linha [11].

Por serem problemas que geram custos que podem ser evitados, eles são muito estudados a fim de entendê-los e minimizados. Assim, para cada componente em um meio específico haverá diferentes condições de trabalho, o qual exigirá total compreensão para que seja possível saná-los de maneira efetiva.

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade da utilização de recobrimentos superficiais com ligas metálicas amorfas a base de Fe em componentes de aço comum para a indústria (Exemplo: de petróleo e gás natural), com a finalidade de um melhor desempenho de resistência à corrosão e um menor custo de manutenção em longo prazo. Para isso, foram feitos estudos comparativos, com ligas comumente utilizadas, em relação ao custo e às propriedades referentes à corrosão e desgaste, levando em conta fatores de impacto ambiental.

### 4. Metodologia

Para a avaliação do desempenho dos materiais foram pesquisados dados referentes ao comportamento na corrosão e desgaste dos recobrimentos em condições específicas, que estão presentes em diversos meios da indústria petrolífera. Os dados foram obtidos através de empresas fornecedoras e artigos científicos. Por tal fato, as análises dessa seção foram divididas em “recobrimentos comerciais”, se referindo a materiais e processos já comercializados, e “recobrimentos potenciais”, que são materiais em estudos na literatura científica e que podem ser aplicados na área.

Nos recobrimentos comerciais o desempenho no desgaste foi comparado através da dureza das camadas e do ensaio ASTM G65-04 [12], de perda de massa. Para as ligas potenciais foram utilizados valores da dureza como parâmetro de resistências ao desgaste e da densidade de corrente passiva e patamar de corrente passiva como parâmetros de resistência a corrosão.

### 5. Resultados e Discussão

Os recobrimentos metálicos amorfos pertencem a uma categoria de estudo ainda em recente desenvolvimento. O desempenho destes materiais e seu processamento dependerão de inúmeros parâmetros envolvidos, uma vez que o processo terá que dar condições para a formação de fases amorfas e, ao mesmo tempo, para a formação de uma camada relativamente densa sobre o depósito, a fim de dar condições de resistência à corrosão e ao desgaste. Todos esses fatores deverão estar aliados a uma boa aderência ao substrato. Assim, o desempenho das camadas depositadas será separado em duas categorias: Recobrimentos comerciais e recobrimentos potenciais.

#### Recobrimentos comerciais

Os recobrimentos contendo metais amorfos citados neste item assim como suas propriedades são fornecidas por empresas privadas especializadas neste seguimento. Os recobrimentos 1, 2 e 3 foram feitos pela técnica de HVOF, enquanto que o 4, 5, 6 e 7 foram processados através de TWAS.

Todos possuem um alto teor de Cr, elemento essencial para formação de camada passiva, conferindo resistência à corrosão. O alto teor relativo de B é essencial na formação da fase vítrea no recobrimento, sendo esta a responsável pelo melhoramento das propriedades de resistência ao desgaste e à corrosão.

A dureza é considerada como um dos fatores para a medida de resistência ao desgaste de um material. A Figura 6 apresenta os valores desta propriedade para as camadas aspergidas termicamente, assim como para 3 tipos de aços inoxidáveis austeníticos e um tipo de aço carbono comum. Observa-se que o valor da dureza das camadas com estrutura amorfa produzidas pela empresa Nanosteel Co. é muito superior (aproximadamente 5 vezes maior) ao das ligas

convencionais cristalinas, sugerindo uma alta resistência ao desgaste.

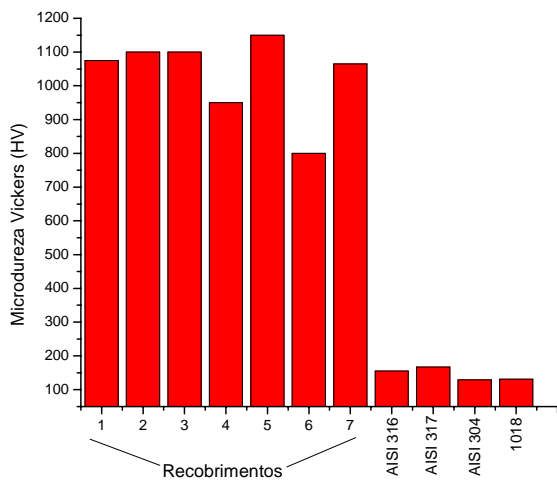


Figura 6. Microdureza dos diferentes materiais comparados [13,14]

Para ilustrar quantitativamente o desempenho destes recobrimentos frente ao desgaste, são mostrados na Figura 7 os dados compilados dos ensaios de desgaste fornecidos pela empresa Nanosteel Co. [13]. Observa-se alta resistência ao desgaste das camadas. O mesmo ensaio feito em um aço 1010 é plotado para comparação. É possível observar que a resistência ao desgaste das camadas aspergidas é muito alta, perdendo cerca de 10 vezes menos massa que o aço carbono 1010. Efeito possível graças à estrutura com fases amorfas das camadas aspergidas.

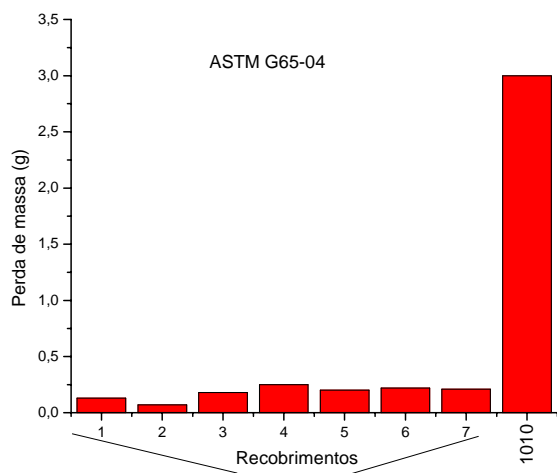


Figura 7. Perda de massa em ensaio de desgaste [13,14]

**Recobrimentos potenciais**

Nos recobrimentos potenciais estão incluídas ligas aspergidas termicamente com uma alta tendência de formação

de amorfo estudadas em artigos científicos, ainda não fabricadas em escala industrial, mas que demonstram potencial aplicação como recobrimento metálico amorfo em ambientes contra corrosão e desgaste. A Tabela 1 mostra os recobrimentos aspergidos que foram compiladas de artigos científicos. Os materiais estudado são denominados por letras de A a K, sendo diferentes na composição, nas condições do ensaio e/ou no seu processamento. Vale ressaltar que os materiais C e D são fundidos em coquilha de cobre (solidificados rapidamente), com a finalidade de comparação com os advindos da aspersão térmica.

Na Figura 8 são mostrados os valores aproximados da microdureza Vickers para três tipos de recobrimento com fase amorfa e para uma chapa de aço inoxidável austenítico 316L. Observa-se que a dureza dos recobrimentos é muito superior à dos aços convencionais (cristalinos) evidenciando uma melhor resistência ao desgaste.

Tabela 1. Composição (at%) e processo das ligas potenciais

Materiais	Process	Ref.
A - Fe <sub>54,2</sub> Cr <sub>18,3</sub> Mo <sub>13,7</sub> Mn <sub>2,0</sub> W <sub>6,0</sub> B <sub>3,3</sub> C <sub>1,1</sub> Si <sub>1,4</sub>	PS	[15]
B - Fe <sub>64,82</sub> B <sub>20,69</sub> Si <sub>1,9</sub> Cr <sub>9,23</sub> Nb <sub>1,8</sub> Mn <sub>1,01</sub> Y <sub>0,55</sub>	TWAS	[16,17]
C - Fe <sub>43</sub> Cr <sub>16</sub> Mo <sub>16</sub> C <sub>15</sub> B <sub>10</sub>	Coquilha	[18]
D - Fe <sub>43</sub> Cr <sub>16</sub> Mo <sub>16</sub> C <sub>10</sub> B <sub>5</sub> P <sub>10</sub>	Coquilha	[18]
E - Fe <sub>48</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub> Y <sub>2</sub>	HVOF	[19]
F - Fe <sub>48</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub> Y <sub>2</sub>	HVOF	[19]
G - Fe <sub>48</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub> Y <sub>2</sub>	HVOF	[19]
H - Fe <sub>49,7</sub> Cr <sub>18</sub> Mn <sub>1,9</sub> Mo <sub>7,4</sub> W <sub>1,6</sub> B <sub>15,2</sub> C <sub>3,8</sub> Si <sub>2,4</sub>	HVOF	[20]
J - Fe <sub>49,7</sub> Cr <sub>18</sub> Mn <sub>1,9</sub> Mo <sub>7,4</sub> W <sub>1,6</sub> B <sub>15,2</sub> C <sub>3,8</sub> Si <sub>2,4</sub>	HVAF	[20]
K - Fe <sub>48</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub> Y <sub>2</sub>	HVOF	[21]
316l (chapa)	XXX	[19]
316l (chapa)	XXX	[19]
316l (chapa)	XXX	[19]

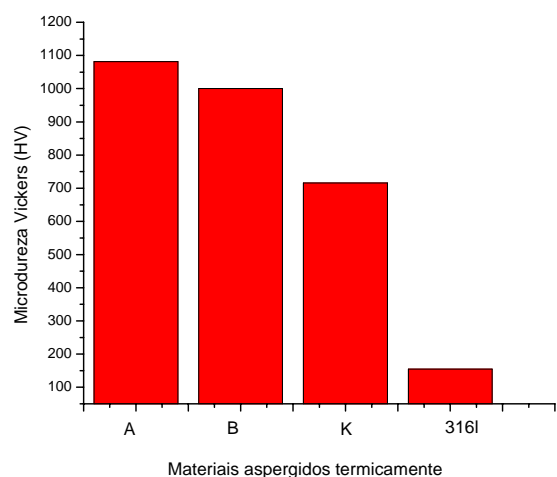


Figura 8. Microdureza dos diferentes materiais potenciais comparados

O desempenho na corrosão dos materiais estudados será comparado segundo dois parâmetros: a densidade de corrente passiva e o patamar de potencial da região passiva.



Os gráficos das Figuras 9, 10 e 11 mostram os valores das corrente passivas retirados de curvas potenciométricas para os meios de 1 M HCl, 3,5% NaCl e 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivamente.

Observa-se que na Figura 9 os materiais com fases amorfas (A, C, D, G e K) possuem densidades de corrente passivas muito menores que a da liga 316l. Os valores dos patamares da região passiva correspondentes giram em torno de 1 V para as ligas amorfas e 0,05 V para o aço inoxidável, mostrando uma maior resistência à corrosão das ligas A, C, D, G e K.

No meio de 3,5% de NaCl (Figura 10), vê-se que a liga cristalina 316l possui baixa densidade de corrente passiva junto com o recobrimento J, porém o patamar da região passiva do aço é de 0,1 V, mostrando que esta não é estável nesse meio e que sofre pela formação de pites pela quebra do filme passivo. Já em um meio mais severo de corrosão com 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Figura 11) o aço 316l possui um desempenho notavelmente melhor comparado ao recobrimento F, vista por uma mais baixa densidade de corrente passiva e por um patamar de 1 V desta região.

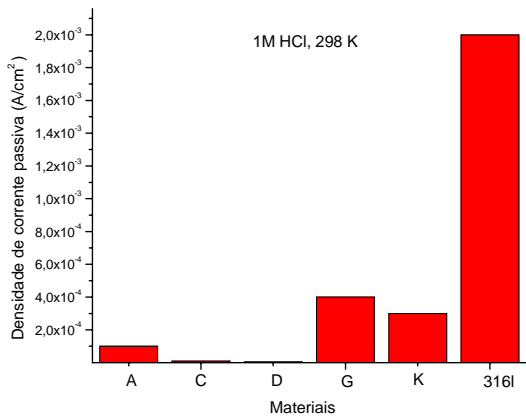


Figura 9. Comparação da densidade de corrente passiva dos materiais em um meio de 1M HCl a 298K

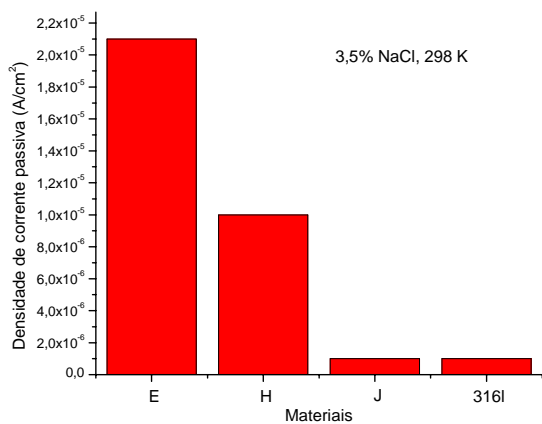


Figura 10. Comparação da densidade de corrente passiva dos materiais em um meio com 3,5% de NaCl a 298K

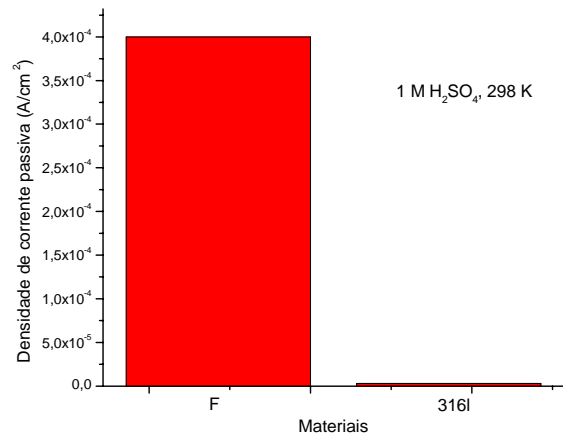


Figura 11. Comparação da densidade de corrente passiva dos materiais em um meio de 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 298K

### Aspectos ambientais e econômicos

Com relação aos aspectos ambientais dos recobrimentos metálicos amorfos, deve ser levada em consideração a emissão de compostos na atmosfera e a geração de resíduos de seu processamento.

Recobrimentos de proteção que podem ser substituídos por recobrimento metálico amorfo, como por exemplo os que utilizam vernizes e tintas, geram compostos orgânicos voláteis (COV), que devem estar em conformidade com os níveis máximos de emissão, podendo restringir e piorar o desempenho dos mesmos. Em componentes que necessitam de alta resistência ao desgaste e corrosão é utilizado recobrimento por cromo duro (devido a sua alta inércia química e dureza), porém o processo gera efluentes líquidos e gasosos contendo cromo hexavalente (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>), que é cancerígeno e prejudicial ao meio ambiente, necessitando de um tratamento posterior [22].

Alternativamente a esses processos, o recobrimento metálico gera nível nulo de compostos orgânicos voláteis e não gera efluentes tóxicos ao meio ambiente. Com relação ao nível de ruído e geração de poeira, pode-se dizer que são equivalentes aos processos de jateamento e pintura [22]. Desta maneira, conclui-se que as vantagens ambientais são maiores para os processos de aspersão térmica.

Os aspectos econômicos estão ligados ao custo de produção de um recobrimento e de custos envolvidos em seu ciclo de vida. Devido a enormidade de variáveis que estão relacionadas a cada condição específica de serviço fica impossível um cálculo da substituição de materiais para uma situação geral.

Assim, analisando uma situação mais específica, faremos os cálculos dos valores para a substituição de uma placa de aço 316 por uma de aço carbono comum recoberta com material termicamente aspergido com estrutura amorfa em uma das faces, atingindo a espessura de 1 mm. Os preços considerados (preços médios por tonelada) de um aço inoxidável 316 é US\$ 5800,00, de um aço baixo carbono é US\$ 900,00 e de um recobrimento por HVOF de liga à base

de Fe com estrutura amorfa é US\$ 70000,00. [23,24] Consideramos uma placa de dimensões 1m x 1m x 0,1m. Para o aço 316, que tem densidade de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>, o preço seria de US\$4640,00. Para um aço carbono, cujo densidade é de aproximadamente 7,9 /cm<sup>3</sup>, o preço seria de US\$ 708,30. O revestimento de 1 mm realizado possui densidade de 7,7 g/cm<sup>3</sup> e eficiência de deposição de 50% (revestimento 1 da Figura 6). Seu preço, já considerando seu rendimento, seria de US\$ 1078,00. Assim a placa recoberta custaria US\$ 1787,00, sendo 2,5 vezes mais barata que a placa de um aço 316. Para essa situação genérica, a substituição é viável economicamente e apresentaria melhor desempenho em relação a corrosão e desgaste além de proporcionar uma maior vida útil ao equipamento ou componente.

## 6. Conclusões

Neste artigo foram apresentadas algumas considerações sobre o desenvolvimento e as aplicações de ligas ferrosas amorfificáveis resistentes ao desgaste em revestimentos produzidos através de aspersão térmica, comparando-os com as ligas comerciais com os reportados na literatura. As conclusões obtidas são apresentadas, de forma sumária, a seguir:

- Os revestimentos metálicos amorfos a base de Fe apresentam excelentes propriedades de resistência à corrosão e desgaste quando comparados à ligas cristalinas convencionais. Uma boa combinação de propriedades os torna muito convenientes para aplicação em diversos componentes da indústria em ambientes agressivos. As ligas comerciais para revestimentos amorfos possuem valores de dureza aproximadamente 5 vezes maiores que dos aço inoxidáveis austeníticos e de taxa de corrosão em água do mar 10 vezes menores.
- As propriedades obtidas pelos revestimentos amorfos são dependentes de muitos parâmetros de processamento e da composição do substrato e do material a ser aspergido. Com isso uma faixa enorme de variáveis pode ser manipulada para se atingir as propriedades necessárias para uma aplicação específica, mostrando uma alta gama de possíveis aplicações.

## Referências

- [1] ABRACO. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/NAbracoP/slide9.htm#MARC A>>. Acesso em: março de 2011.
- [2] Corrosão. Disponível em: [http://www.metalmat.ufjf.br/Indc/index\\_corrosao.htm](http://www.metalmat.ufjf.br/Indc/index_corrosao.htm), site visitado em 17/03/2011. Acesso em março de 2011.
- [3] Suryanarayana, C., Inoue, A. Bulk Metallic Glasses, CRC Press, p. 307-309, 322-329, 2011.
- [4] Marques, P. V. Aspersão Térmica – INFOSOLDA – 2003. Disponível em [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br) – acessado em 10 de maio de 2011.
- [5] Lima, C. C., Trevisan, R. Aspersão térmica- Fundamentos e Aplicações. 2a Edição. ed.: Artliber Editora, 2007
- [6] Metco, S. High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) solutions. Sulzer. Disponível em: <[http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resource/s/documents2/Brochures/HVOFSolutions\\_EN4.pdf](http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resource/s/documents2/Brochures/HVOFSolutions_EN4.pdf)>. Acesso em: Março de 2011..
- [7] Comeli, F. W.. Dissertação de mestrado – Estudos de revestimentos aspergidos por HVOF contra o desgaste em haste de válvulas de turbinas termoelétricas. PPGCEM – Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [8] Schiefler, M. O. F.. Tese de Doutorado - Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica, POSMEC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [9] METCO, S. An introduction to thermal spray. Disponível em: <[http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resource/s/documents2/brochures/ThermalSpray\\_Brochure\\_EN4.pdf](http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resource/s/documents2/brochures/ThermalSpray_Brochure_EN4.pdf)>. Acesso em junho de 2011
- [10] De Souza, E. D.. Dissertação de mestrado – Análise de corrosão por meio de perda de massa e espessura em aços pela ação de água produzida em poços petrolíferos , PPGCEM – Universidade Federal de Sergipe, 2010.
- [11] Gomes, R.V.B, Junior, S.S.C.. Reparo interno “in situ” de dutos por revestimentos epoxídicos. Em: 2º Congresso Brasileiro de PeD em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro-Brasil, 18 a 23 de junho, 2003.
- [12] American Society for Testing and Materials. G65-04. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, 2010.
- [13] Nanosteel Co. Disponível em: [www.nanosteel.com](http://www.nanosteel.com). Acessado em março de 2011.
- [14] Matweb - Material Property Data. Disponível em [www.matweb.com](http://www.matweb.com). Acessado em março de 2011.
- [15] Zheng, Y. G., Chang, X. C., Hou, W. L., Wang, J. Q., Tang, Z. , Burgess, A. Microstructure and properties of Fe-based amorphous metallic coating produced by high velocity axial plasma spraying, J. Alloys and Compounds, v. 484, p.300-307, 2009.
- [16] Cheng, J., Liang, X. , Xu, B. , Wu, Y. Formation and properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloy coating prepared by wire arc spraying process. J. Non-Cryst. Solids, v. 355, p. 1673-1678, 2009.
- [17] Cheng, J., Liang, X. , Xu, B. , Wu, Y Characterization of mechanical properties of FeCrBSiMnNbY metallic glass coatings, Journal of Materials Science, v.44, p. 3356–3363, 2009.
- [18] Pang, S. J, Zhang, T., Asami, K., Inoue, A. Synthesis of Fe-CrMo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. Acta Mater, v.50, p. 489-497, 2002.
- [19] Zhou, Z., Wang, L, Wang, F. C., Zhang, H. F., Liu, Y. B., Xu, S. H. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings by HVOF thermal spraying. Surface & Coatings Technology, 204, n. 5, 563-570, 2009.
- [20] Guo, R. Q., Zhang, C., Chen, Q., Yang, Y., Li, N., Liu, L. Study of structure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by HVAF and HVOF, Corrosion Science, v. 53, p.2351–2356, 2011

- [21] Ni, H. S., Liu, X. H., Chang, X. C., Hou, W. L., Liu, W., Wang, J. Q. High performance amorphous steel coating prepared by HVOF thermal spraying, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 467, p. 163–167, 2009.
- [22] Takimi, A., Possamai, L., Bergmann, C. P., Revestimentos depositados por aspersão térmica hipersônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro. Disponível em <http://www.rijeza.com.br>. Acessado em maio de 2011.
- [23] Informação fornecida por e-mail pela empresa Nanosteel Co.
- [24] Preço do aço carbono. Disponível em: <http://www.meps.co.uk/World%20Carbon%20Price.htm>. Acessado em abril de 2011.