INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Utilização de óxido de alumínio sinterizado como preparação de superfície para aplicação de revestimentos por aspersão térmica

Neusvaldo Lira de Almeida[1], Eduardo de Assis Faria[2], Marcos Prata[3] , Rafael Tadeu Acconcia[4]

Abstract

The thermal spray process is very useful for the application of metallic coatings for corrosion protection. For this purpose, the most employed metals are zinc, aluminum or zinc-aluminum alloy. In all of the processes of coating applications, whether metallic or organic, the surface treatment is one of the most important steps. In the thermal spray process, this requirement is still more critical, because the contamination of the surface with oxides, dust or residues of abrasives can affect the coating adhesion and consequently its performance. The abrasives used for the application of coatings for thermal spray must be completely clean and without contamination with oxides or soluble salts. The main abrasive used for this purpose is pure aluminum-oxide. In this paper, the sinter aluminum-oxide was used. Although this abrasive presents iron-oxide in high concentration, it seems to be inert and it does not interfere in the coating characteristics. The aim of this work is to evaluate the blasting characteristics of sinter aluminum-oxide when used for surface treatment and to compare it with the usual abrasives. Initially, the sinter aluminum-oxide was submitted to chemical analysis and later, coupons of carbon steel SAE 1010 were submitted to blast cleaning with two kinds of abrasives: pure aluminum-oxide and sinter aluminum-oxide. After that, a layer of TSA was applied with 250 µm of thickness. The characteristics of the obtained coating were appraised through metallographic exams, EDS analyses, flexibility, adhesion to traction (Pull-Off) and an immersion test in solution of NaCl 3%. There was no difference between both coatings relative to flexibility, adhesion and corrosion resistance.

Resumo

A aspersão térmica é um processo muito utilizado para aplicação de revestimentos metálicos para proteção contra a corrosão. Para esta finalidade, os metais mais empregados são o zinco e o alumínio isoladamente, ou ainda uma camada à base de zinco-alumínio. Em todos os processos de aplicação de revestimentos, sejam metálicos ou orgânicos, a preparação da superfície desempenha uma função muito importante. No caso da aspersão térmica, este pré-requisito é ainda mais crítico, pois a contaminação da superfície com camadas de óxidos, poeira ou resíduos de abrasivos pode comprometer a aderência do revestimento e conseqüentemente o seu desempenho. Por esta razão, o abrasivo utilizado nos processos de

[1] Mestre em Engenharia – Laboratório de Corrosão e Proteção – IPT.
[2] Técnico de Laboratório – Laboratório de Corrosão e Proteção – IPT.
[3] Engenheiro – Mineradora Curimbaba.
[4] Diretor Técnico – Mineradora Curimbaba.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

jateamento final para aplicação de revestimentos por aspersão térmica é, normalmente, o óxido de alumínio puro (isento de contaminação com óxidos ou com sais solúveis). Neste trabalho, foi utilizado o óxido de alumínio sinterizado como alternativa ao óxido de alumínio puro que, embora apresente uma concentração de óxido de ferro consideravelmente superior à do óxido de alumínio puro, este óxido parece ser inerte. O objetivo deste trabalho foi comparar as características do revestimento obtido com a superfície preparada com o óxido de alumínio sinterizado com as do revestimento obtido com o abrasivo normalmente utilizado. Inicialmente foi feita uma análise química do óxido de alumínio sinterizado e um ensaio de imersão deste abrasivo em solução de cloreto de sódio 5%. A análise química do óxido de alumínio sinterizado apresentou um teor de ferro de cerca de 8%, mas não houve alterações visuais na solução de NaCl. Posteriormente, corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1010 foram submetidos a jateamento abrasivo com óxido de alumínio puro e com o óxido de alumínio sinterizado. Em seguida foi aplicada uma camada de 250 μm de espessura para as duas condições de preparação. As características do revestimento obtido foram avaliadas por meio de exames metalográficos, análises por dispersão de energia e ensaio de resistência à tração (*Pull-Off)* e flexibilidade. Os resultados obtidos foram comparados com os do revestimento aplicado com jateamento usual e constatou-se que os revestimentos apresentaram características e desempenho idênticos, indicativo de que a superfície metalizada não sofreu contaminação com óxido de ferro existente no abrasivo.

Palavras chaves*: alumínio, aspersão térmica, preparação de superfície, óxido de alumínio sinterizado.*

1. Introdução

O aço-carbono é o metal estrutural mais utilizado tanto para estruturas internas como externas. No entanto, este material possui uma resistência à corrosão relativamente baixa na maioria dos meios de exposição incluindo as águas naturais, solos e atmosfera, principalmente em atmosferas marinhas ou naquelas com grande concentração de gases industriais. Por esta razão, o aço-carbono em praticamente todas as aplicações é utilizado associado com uma proteção contra a corrosão, normalmente por revestimentos metálicos, por meio de pintura ou por uma combinação dos dois processos. Para aplicação de revestimentos metálicos para proteção contra a corrosão, um dos métodos utilizados é a aspersão térmica. Neste caso, os metais empregados são o zinco e o alumínio, separadamente ou uma liga destes dois metais. Com isto, associa-se a resistência mecânica do aço-carbono com a resistência à corrosão do zinco e/ou do alumínio, uma vez que estes metais possuem excelente resistência à corrosão na maioria dos meios de exposição.

Em todos os processos de aplicação de revestimentos, seja metálico ou orgânico, a preparação da superfície desempenha uma função muito importante. No caso da aspersão térmica, este pré-requisito também é crítico, pois em superfícies contaminadas com poeira, óleo, graxa, com sais solúveis ou com óxidos não é possível obter revestimentos com aderência adequada e isto certamente irá comprometer o desempenho do revestimento e a vida útil da estrutura ou do equipamento.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

A preparação de superfície para a aplicação de revestimento por aspersão térmica é feita por meio de jateamento abrasivo, pois este processo além de eliminar camadas de carepas e de óxidos da superfície, promove um perfil de rugosidade que é fundamental para a ancoragem adequada do revestimento ao substrato. Assim, a escolha do abrasivo a ser utilizado deve levar em consideração a granulometria, a dureza e a geometria, pois estas características determinam em última análise o perfil de rugosidade do substrato. Sabe-se que quanto maior a rugosidade do substrato, melhor será a ancoragem do revestimento e quanto mais duro e pontiagudo for o abrasivo, mais eficiente será o processo de jateamento. Mas, além disto, como a superfície jateada deve estar completamente limpa, os abrasivos devem estar isentos de contaminação e de umidade.

Para esta aplicação, o abrasivo normalmente usado é o óxido de alumínio puro. Neste trabalho, no entanto, a preparação de superfície foi feita com óxido de alumínio sinterizado. As características do revestimento obtido foram comparadas com as do abrasivo normalmente utilizado. Inicialmente, foi feita uma análise química do óxido de alumínio sinterizado, ensaio de imersão do abrasivo em solução de NaCl 3% e analisado o teor de ferro na solução. Posteriormente, corpos-de-prova de aço-carbono SAE 1010 foram jateados com o abrasivo normalmente usado e com o óxido de alumínio sinterizado. Em seguida foi aplicada uma camada de alumínio por aspersão térmica com 250 µm de espessura nas duas condições. As características do revestimento obtido foram avaliadas por meio de exames metalográficos, análises por dispersão de energia, ensaio de resistência à tração (*Pull Off*) e de flexibilidade. Os resultados obtidos foram comparados com os do revestimento aplicado sobre substratos preparados com o óxido de alumínio puro.

2. Características de revestimentos aplicados por aspersão térmica

As espessuras dos revestimentos obtidos por aspersão térmica são maiores do que as obtidas por outros processos. Os revestimentos são normalmente densos e de baixa uniformidade macroscópica e, em geral, a superfície do revestimento apresenta muita aspereza (com rugosidade acentuada). Na Figura 1, está mostrada uma representação esquemática de um revestimento aplicado por aspersão térmica, ilustrando algumas partículas não-fundidas, poros no interior da camada e óxidos na interface metal/revestimento e no interior da camada também.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

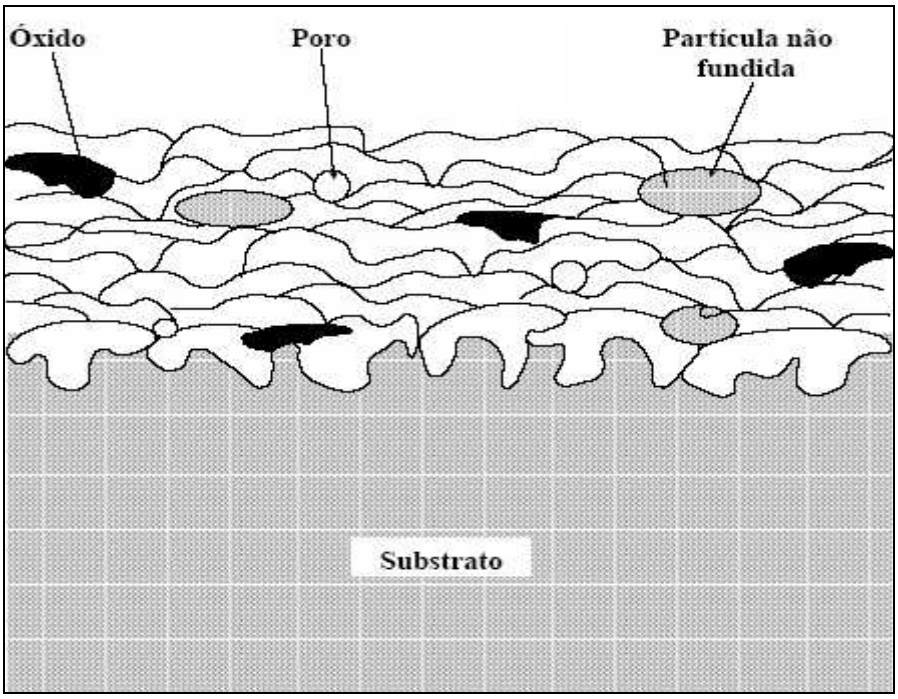

Figura 1 – Aspecto característico de uma camada de revestimento aplicada por aspersão térmica.

3. Características do abrasivo

A norma N-2568 da Petrobrás descreve detalhadamente o processo de metalização para proteção contra a corrosão, bem como as especificações relativas às matérias primas e aos procedimentos a serem aplicados. De acordo com esta norma, o abrasivo especificado para limpeza final deve ser óxido de alumínio puro, não sendo permitido o uso de qualquer outro tipo de abrasivo. Ele deve estar limpo e seco, deve ser pontudo e cortante, isento de poeira, óleo, carepa, ferrugem e outros contaminantes como sais solúveis e excesso de finos. Nas etapas preliminares do jateamento, no entanto, poderão ser usados outros abrasivos inclusive a granalha de aço.

4. Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu de caracterização do abrasivo, preparação de corpos-de-prova com óxido de alumínio puro e com o óxido de alumínio sinterizado, avaliação qualitativa do processo de jateamento, ensaios de imersão do abrasivo em solução de cloreto de sódio e aplicação e caracterização do revestimento. Estas atividades estão descritas a seguir.

- ***Caracterização do abrasivo***

Uma amostra do óxido de alumínio sinterizado foi submetida à análise química qualitativa por fluorescência de raios X e por difração de raios X e à análise quantitativa por espectroscopia de plasma. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

Tabela 1 – Caracterização do abrasivo – óxido de alumínio sinterizado

Análises	Resultados
Fluorescência	**Preponderante:** alumínio e ferro **Pequenas proporções:** silício, titânio e potássio.
Difração	Óxido de alumínio (coríndon) Óxido de ferro (hematita) Silicato de alumínio (mullita) Óxido de silício (quartzo) Óxido de ferro (magnetita)
Espectroscopia de Plasma	Teor de ferro – 7,7%

Como já tinha sido comentado, o óxido de alumínio sinterizado contém uma quantidade de óxido de ferro muito superior a do óxido de alumínio puro. Nas etapas seguintes, será avaliado o caráter inerte deste abrasivo. Isto é, se poderá haver efeitos indesejáveis nas características e no desempenho do revestimento, decorrentes desta contaminação.

- ***Preparação dos corpos-de-prova***

Corpos-de-prova de aço-carbono foram jateados ao metal branco de acordo com o padrão visual Sa 3 da norma ISO 8501-1, com óxido de alumínio puro e com óxido de alumínio sinterizado.

- ***Avaliação qualitativa do processo de jateamento.***

Para verificar se o jateamento com óxido de alumínio sinterizado causava alguma contaminação na superfície, proveniente do abrasivo com óxido de ferro, foi realizado um ensaio qualitativo logo após o jateamento. Esta avaliação consistiu em colocar gotas de solução de sulfato de cobre sobre a superfície de uma peça de aço inoxidável jateada com os dois abrasivos. Quando o abrasivo contém muito óxido de ferro, parte dele fica impregnada na superfície do aço inoxidável e ao gotejar a solução de sulfato de cobre, aparece o depósito característico de cobre. Após esta avaliação, foram observados apenas dois pontos com depósito de cobre; resultado idêntico ao obtido com o abrasivo sem óxido de ferro. A Figura 2 mostra a superfície do aço inoxidável após gotejamento de solução de sulfato de cobre.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

Figura 2 – Superfície de aço inoxidável após o jateamento com óxido de alumínio sinterizado e após gotejamento de solução de sulfato de cobre. Nota-se o depósito de cobre.

Com base nesta avaliação qualitativa, aparentemente, conclui-se que o óxido de ferro existente no abrasivo não ficou impregnado na superfície do aço ou se ficou algum resíduo, não apresentou reação com o cobre, o que pode ser indicativo da ausência ou de uma característica inerte.

- ***Ensaios de imersão do abrasivo em solução de cloreto de sódio – análise de ferro na água após o ensaio e em branco (referência)***

Com o objetivo de avaliar o caráter inerte do óxido de ferro existente no óxido de alumínio sinterizado, foi realizado um ensaio de imersão deste abrasivo em solução de cloreto de sódio 5%. Para isto foram imersas 10 g de abrasivo na solução de cloreto de sódio durante 30 dias. No decorrer do ensaio, a solução foi avaliada visualmente e após este período, foi analisado o teor de ferro na solução e comparado com o teor de ferro em uma solução em branco (referência). Não houve alterações perceptíveis a olho desarmado do aspecto da solução e, para ambos as soluções, o teor de ferro encontrado foi inferior a 1 ppm que era o limite de detecção da técnica.

- ***Aplicação do revestimento***

Após o jateamento, foi medida a rugosidade do substrato, tendo-se obtido um perfil de 60 µm a 70 µm de rugosidade para o abrasivo convencional e da ordem de 80 µm para o óxido de alumínio sinterizado. Em seguida foi aplicada uma camada de alumínio por aspersão térmica com espessura de camada de 250 µm nas chapas submetidas à limpeza com os dois tipos de abrasivos.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

- ***Ensaios de caracterização do revestimento***

O revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica foi submetido aos ensaios de flexibilidade, de aderência, exames metalográficos e à análise por dispersão de energia. O ensaio de flexibilidade foi realizado sobre o ângulo de 90° com mandril cilíndrico. Não foi constatada formação de fissuras ou trincas na superfície dos revestimentos. Para verificação da aderência, foi utilizado o método *Pull Off*, utilizando-se um equipamento tipo Pati IV. O ensaio foi realizado em corpos-de-prova jateados com óxido de alumínio puro e com o óxido de alumínio sinterizado. Os resultados obtidos foram os seguintes:
- com óxido de alumínio puro – 14 MPa.
- com óxido de alumínio sinterizado – 12 MPa.

Uma seção transversal dos corpos-de-prova foi avaliada também por meio de exames metalográficos e de análise por dispersão de energia (EDS). As Figuras 3 e 4 mostram as seções transversais dos revestimentos aplicados com preparação de superfície feita com os dois abrasivos. Analisando estas figuras, pode-se notar que, em ambos os casos, os revestimentos apresentam os mesmos aspectos. As regiões escuras observadas nas camadas são poros no revestimento e são característicos de revestimentos aplicados por aspersão térmica. Não foram observadas quaisquer diferenças entre os revestimentos. Estas figuras mostram também que os dois revestimentos encontram-se aderentes ao substrato.

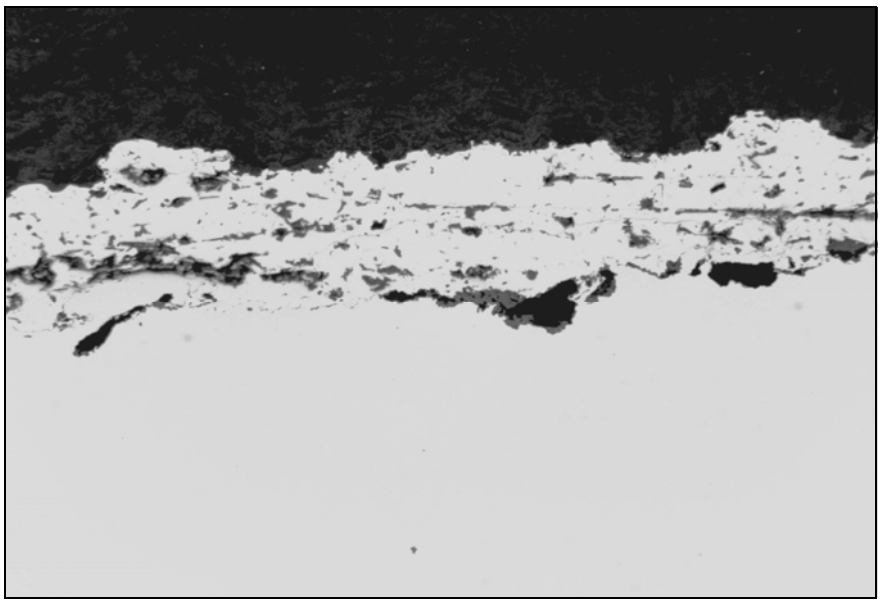

Figura 3 – Seção transversal do revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica sobre uma superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio sinterizado.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

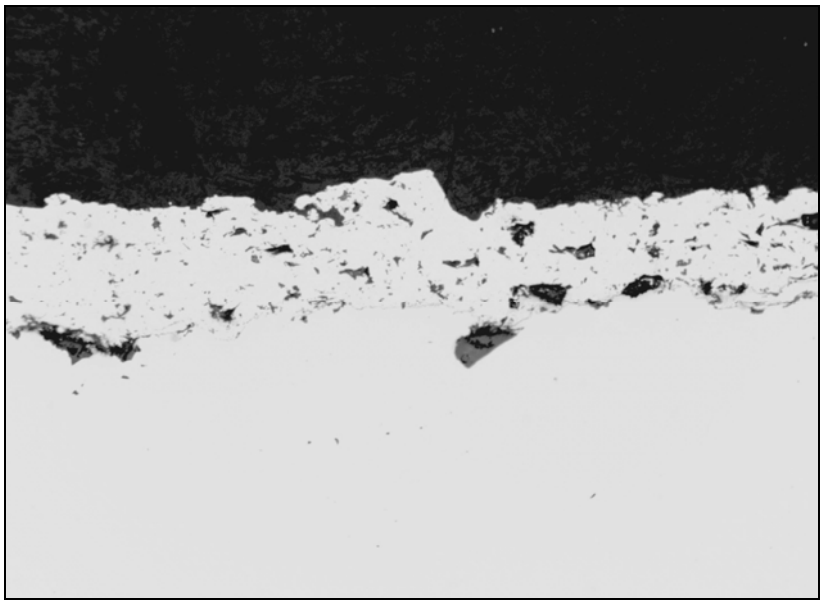

Figura 4 – Seção transversal do revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica sobre uma superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio puro.

A análise por dispersão de energia foi realizada com um microscópio eletrônico de varredura marca Jeol Modelo JSM 6300. Não foi detectada a presença de óxido na camada como pode ser observado nas Figuras 5 e 6. Os espectros das análises por EDS estão mostrados nas Figuras 7 e 8.

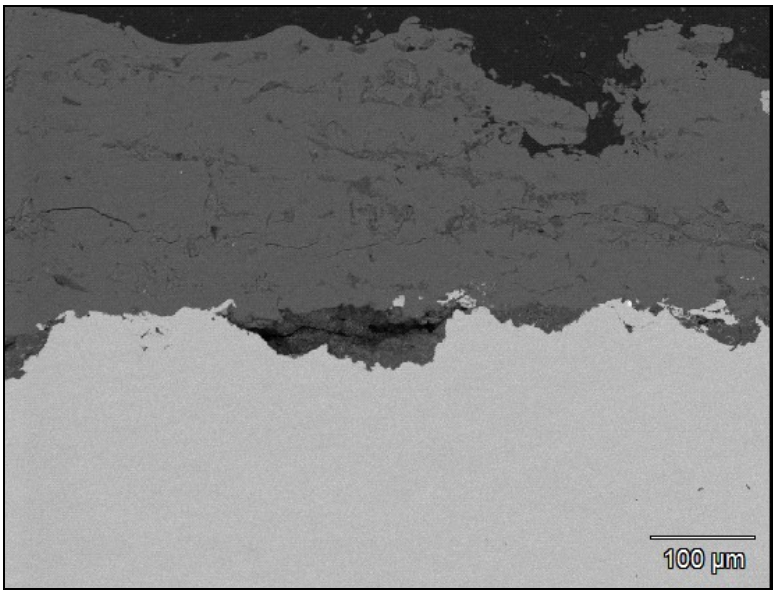

Figura 5 – Aspecto da seção transversal do revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica sobre uma superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio puro, obtida no microscópio eletrônico de

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

varredura.

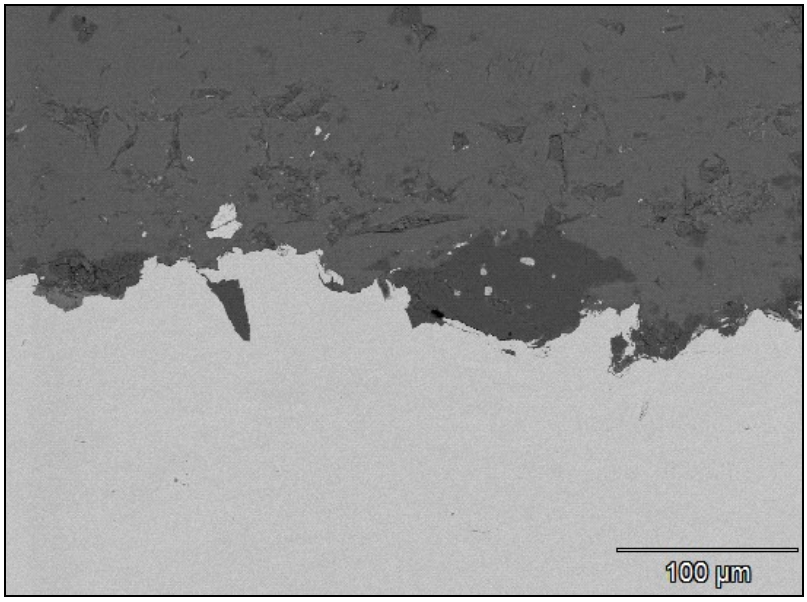

Figura 6 – Aspecto da seção transversal do revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica sobre uma superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio sinterizado, obtida no microscópio eletrônico de varredura.

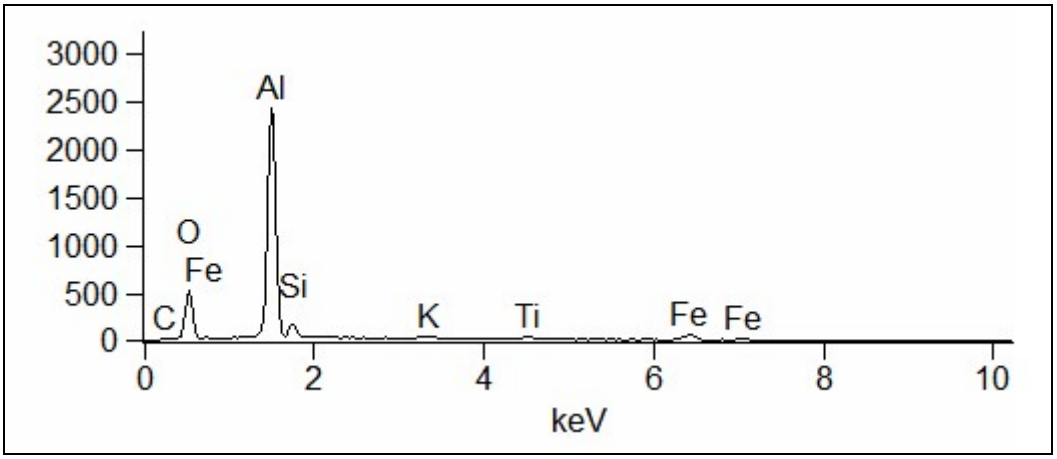

Figura 7 – Espectro obtido no revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica na superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio sinterizado.

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

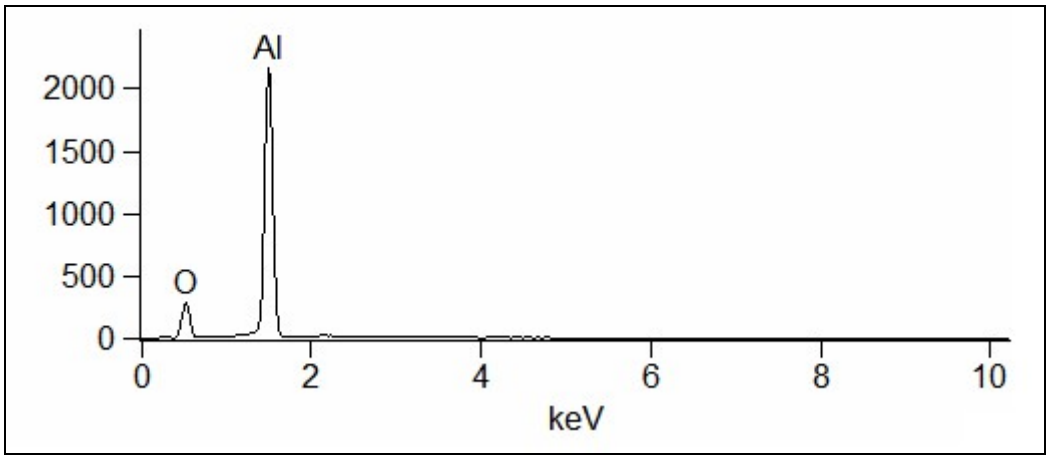

Figura 8 – Espectro obtido no revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica na superfície de aço-carbono jateada com óxido de alumínio puro.

5. Análise dos Resultados

Os revestimentos aplicados por aspersão térmica são normalmente densos e de baixa uniformidade macroscópica. Em geral a superfície do revestimento apresenta-se muita áspera (com rugosidade acentuada) que é uma característica intrínseca dos revestimentos aplicados por este processo.

O desempenho dos revestimentos tanto metálicos como orgânicos, para proteção contra a corrosão e, em particular dos aplicados por aspersão térmica, é altamente dependente do grau de preparação da superfície. Em geral, estes revestimentos apresentam poros que podem expor o metal-base. No entanto, em função das espessuras normalmente aplicadas, os poros são de pequenas dimensões e não causam problemas ao metal-base. No caso do zinco, o revestimento protege catodicamente o substrato e no caso do alumínio, ocorre inicialmente alguma corrosão do aço, cujo processo produz íons férricos que provocam a corrosão do alumínio do revestimento. Esta corrosão leva à formação de óxidos de alumínio que selam os poros do revestimento (PANOSSIAN et al., 1982). No entanto, se a superfície estiver contaminada com óxidos, sais solúveis, pó, resíduos de abrasivos etc. o metal de revestimento não adere ao substrato e os defeitos terão dimensões capazes de expor grandes áreas do metal-base.

De acordo com a norma N 2568 da Petrobras, para evitar a contaminação da superfície, o abrasivo utilizado na etapa final da preparação da superfície deve estar limpo e seco, isento de poeira, óleo, carepa, ferrugem e outros contaminantes como sais solúveis e excesso de finos. Por esta razão, para a limpeza final, esta norma especifica o óxido de alumínio puro. Nas etapas intermediárias do jateamento, no entanto, podem ser usados outros abrasivos inclusive a granalha de aço.

Neste trabalho, foi utilizado o óxido de alumínio sinterizado em todas as etapas da preparação da superfície. Cabe citar que este abrasivo contém um teor elevado de óxido de ferro (da ordem de 8% de ferro), o que poderia inviabilizar o seu uso para esta aplicação. No entanto, os ensaios mostraram que o óxido de alumínio sinterizado não sofreu oxidação quando em contato com solução de cloreto de sódio 5% e que não houve alterações perceptíveis a olho

INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

desarmado do aspecto da solução. Tanto para a solução em branco, como para a solução na qual foi realizado o ensaio de imersão do óxido de alumínio sinterizado, o teor de ferro encontrado foi inferior a 1 ppm que era o limite de detecção da técnica. Ou seja, não houve transferência do ferro do abrasivo para a solução.

O revestimento obtido foi submetido aos ensaios de flexibilidade, de aderência, exames metalográficos e à análise por dispersão de energia. Não foi constatada formação de fissuras ou trincas na superfície do revestimento. Constatou-se ainda que as características do revestimento mantiveram-se exatamente como as obtidas a partir dos processos com o abrasivo usual.

No exame metalográfico e na análise por dispersão de energia, constatou-se que, em ambos os casos, os revestimentos apresentaram os mesmos aspectos. Não foram observadas quaisquer diferenças entre os revestimentos. As Figuras 3 e 4 mostram também que os dois revestimentos estão aderentes ao substrato. A análise por dispersão de energia realizada na superfície dos dois revestimentos não detectou a presença de óxido como pode ser observada nas figuras 5 e 6.

6. Conclusão

Os ensaios e as análises realizadas no óxido de alumínio sinterizado e no revestimento de alumínio aplicado por aspersão térmica mostraram que este abrasivo, embora contenha um teor elevado de óxido de ferro (da ordem de 8% de ferro), não causou qualquer contaminação na superfície do metal-base, o que poderia resultar em comprometimento das características do revestimento, mais especificamente perda de aderência. Embora o teor de ferro seja elevado, o abrasivo mostrou-se totalmente inerte; isto é não reagiu mesmo no ensaio de imersão em solução de cloreto de sódio.

7. Referência Bibliográfica

KAJIMOTO, Z.P.; ALMEIDA, N. L.; SIQUEIRA, F,J,S. *Corrosão atmosférica de metais no Estado de São Paulo*. São Paulo : IPT. 1991. 86 p. (Publicação IPT 1826).

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Durotec pela preparação dos corpos-de-prova.