

Ensaaios de Adesão em Revestimentos Metal-cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma

Adhesion Tests in Plasma Sprayed Metal-ceramic Coatings

CARLOS ROBERTO CAMELLO LIMA

*Prof. do Departamento de Engenharia de Métodos e Processos (UNIMEP)
crclima@unimep.br*

ROSEANA DA EXALTAÇÃO TREVISAN

*Prof. do Depto. de Eng. de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica (Unicamp)
roseana@fem.unicamp.br*

RESUMO: A resistência mecânica de um revestimento efetuado por aspersão térmica compreende a aderência entre este e o substrato (adesão), bem como a coesão entre as partículas depositadas. Atualmente, existe uma grande diversidade de testes destrutivos e não destrutivos para a pesquisa de aderência de revestimentos. A maioria desses testes traz deficiências que, de algum modo, mascaram os resultados alcançados. Além disso, encontra-se freqüentemente na literatura técnica resultados de testes de tração sem especificação do método empregado ou sem clareza dos procedimentos, o que torna praticamente impossível uma comparação criteriosa da qualidade dos materiais ou dos processos utilizados. Essa constatação tem conduzido nos últimos anos a um esforço em âmbito internacional, e mesmo nacional, pela unificação da metodologia empregada. Neste trabalho, é mostrada, por meio de desenvolvimento experimental, a importância de se trabalhar com ensaios normalizados, como o ensaio de adesão ASTM-D3359, o de dureza da norma ASTM-E18-84 e, em especial, o ensaio de adesão da norma ASTM-C633-79. Discute-se, também, os cuidados a serem observados na execução dos testes para validade dos resultados. Como resultado específico, são analisadas as propriedades de dureza e adesão de revestimentos cerâmicos depositados por aspersão térmica a plasma.

Palavras-chave: adesão – aspersão térmica – revestimentos – ensaio – metal-cerâmica.

ABSTRACT: The mechanical strength of a thermal sprayed coating includes the adhesion of the coating to the substrate and the cohesion among deposited particles. There are several adhesion tests to evaluate the adhesion strength of thermal spray coatings. The greater number of them present deficiencies which can lead to incorrect results. Moreover, in the current literature we can find a lot of tests results with no specification of the method used, making impracticable to compare the quality of materials and processes used. This verification have leaded to an international and even national effort for the standardization of the methods and procedings. This work shows the importance of apply standardized tests based on experimental development using the adhesion standard tests ASTM-C633, ASTM-D3359 and the hardness standard test ASTM-E-18-84. As a specifical result, the hardness and adhesion properties of plasma-sprayed metal-ceramic coatings are studied.

Keywords: adhesion test – hardness – thermal-spray – coating – metal-ceramic.

A **aspersão térmica**, ou *thermal-spraying*, é um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato, formando um depósito aspergido (AWS, 1985). A natureza do processo é sinérgica, ou seja, existem diversas variáveis e componentes envolvidos, os quais, quando atuando juntos e propriamente aplicados, produzem um efeito maior do que se considerados individualmente. A estrutura dos depósitos é lamelar e a ligação entre as lamelas e o substrato pode ser mecânica, metalúrgica, química, física ou uma combinação dessas formas.

A principal vantagem do processo de aspersão térmica é a habilidade para acomodar as propriedades do revestimento à sua aplicação. Um material particular pode ser aspergido para formar um revestimento duro ou macio, poroso ou denso. Essa versatilidade apresenta dificuldades quando se tenta comparar propriedades reportadas de revestimentos distintos.

A resistência mecânica (tração) de um depósito por aspersão térmica consiste na ligação entre o depósito e o substrato (adesão) e a atração interpartículas (coesão). A adesão do revestimento ao substrato está relacionada a interações superficiais da partícula. Os mecanismos de ligação dividem-se em três categorias: mecânica, metalúrgico-química e física. A adesão é uma combinação desses mecanismos. Uma partícula fundida atingindo uma superfície preparada convenientemente irá aplainar e se conformar à superfície ondulada e se ligará mecanicamente às asperidades ali presentes.

Quando ocorre difusão ou ligação metálica, incluindo a formação de compostos intermetálicos e soluções sólidas, o mecanismo de adesão é metalúrgico-químico. A adesão da partícula ao substrato por forças de Van der Waals ou ligações de valência secundária é uma ligação física. A ligação coesiva, que é a ligação partícula-partícula, opera nos mesmos princípios que governam a adesão da partícula ao substrato. Para a ligação adesiva, há influência de características da partícula como massa, taxa de temperatura e conteúdo de calor, além da influência do processo de aspersão. Para um mesmo material, por exemplo, depósitos executados pelo processo por detonação apresentam uma maior resistência à tração do que os executados por plasma (Wang, 1993).

Como os mecanismos acima pressupõem um contato íntimo entre camada e substrato, é de se esperar que as superfícies a serem revestidas estejam efetivamente limpas, isto é, livres de qualquer produto estranho que dificulte os mecanismos de ligação. A ineficiência dessa limpeza pode levar ao rompimento das peças exatamente na interface revestimento/substrato, conforme Bailão e Trevisan (1997).

A tecnologia de aplicação de revestimentos pelo processo de aspersão térmica ainda necessita de bastante trabalho de pesquisa e de desenvolvimento para que se tenha um melhor entendimento dos mecanismos envolvidos na formação do revestimento e da influência dos diversos parâmetros do processo, bem como para que se alcance melhorias de propriedades do revestimento, eficácia de deposição e adesão ao substrato.

Atualmente, existe uma grande diversidade de testes destrutivos e não destrutivos para a pesquisa de aderência de revestimentos. A maioria desses testes traz deficiências que, de algum modo, mascaram os resultados alcançados. Além disso, encontra-se freqüentemente na literatura técnica resultados de testes de tração sem especificação do método empregado, o que torna praticamente impossível uma comparação criteriosa da qualidade dos materiais ou dos processos utilizados. Essa constatação tem conduzido nos últimos anos a um esforço em âmbito internacional, e mesmo nacional, pela unificação da metodologia empregada (Lima & Trevisan, 1996; e Maranhão, 1996).

O principal objetivo deste trabalho é mostrar, por meio de processo experimental, a importância de utilizar ensaios normalizados, em especial o ensaio de adesão da norma ASTM-C633-79, ASTM-D3359 e de dureza da norma ASTM-E18-84 e os cuidados a serem observados na execução dos testes para validade dos resultados. Como objetivo específico, serão analisadas as propriedades de dureza e adesão de revestimentos cerâmicos depositados por aspersão térmica a plasma.

Materiais e métodos

O desenvolvimento do trabalho experimental é baseado em aplicações de revestimento cerâmico sobre substrato metálico, com função de barreira térmica, conhecido como TBC (Thermal Barrier Coating). Normalmente, um TBC é composto de uma camada de base metálica e uma camada externa de cerâmica. Nesse experimento, foram usadas alternadamente, além de camadas de base metálicas convencionais, camadas de base mistas metal-cerâmicas com composição variada. O material base (substrato) é uma superliga à base de níquel (Inconel 718). Os pós utilizados no revestimento serão um pó metálico Ni-Cr-Al e um pó cerâmico de Zircônia parcialmente estabilizada com 8% de Ytria, ambos aplicados pelo processo de aspersão térmica a plasma.

Os pós foram pré-misturados antes da aplicação, com camada de base 100% metálica (denominada 100-0), 25% metálica-75% cerâmica (denominada 25-75) ou 50% metálica-50% cerâmica (denominada 50-50), sendo aplicados em quantidades de camadas e espessuras variadas, evoluindo até que a última camada externa fosse totalmente cerâmica, para todos os casos.

Para aspersão dos pós, utilizou-se um equipamento a plasma de arco não transferido, modelo 7MC-II, com alimentador de pós 6MP-Dual e pistola 9MB. Os parâmetros operacionais foram fixados e mantidos durante todo o experimento, conforme apresentado na tabela 1. Os corpos de prova empregados como substrato eram cilíndricos de ϕ 25 mm, com 25 mm de comprimento, conforme indicado na norma ASTM-C633-79.

Tabela 1. Parâmetros operacionais fixados para o experimento.

PISTOLA DE ASPERSÃO		ALIMENTADOR DE PÓ	
- Tipo: 9MB - Bico: GH-732 - Porta pó: #2 - Isolador: 7M50		- Unidade: 3MP - Roldana: S-20 RPM - Fluxo gás de arraste: 37	
GÁS		ENERGIA	
Primário – Ar – Pressão: 100 psi – Fluxo: 80 Secundário – H ₂ – Pressão: 50 psi – Fluxo: 20		- Amperagem do arco: 500 amp - Voltagem: 70 Volts DC	
ASPERSÃO			
- Distância: 80 mm - Taxa de Deposição: 2,4 lbs/h - Eficiência do Depósito: 65% - Vel. Deslocamento (dispositivo): 0,10 m/s			

Antes da aplicação dos revestimentos, os corpos de prova eram desengraxados em solução de tricloroetileno e, em seguida, efetuava-se o jateamento, utilizando-se como elemento abrasivo óxido de alumínio triangular, 16 x 24 da Carburundum. A rugosidade média conseguida era de 8,2 μ m (Ra).

Foram realizadas medidas de macrodureza em todos os corpos de prova, seguindo a orientação da American Welding Society (AWS, 1985) que determina escala Rockwell 15N como a mais apropriada para revestimentos na faixa de espessuras aqui executada. Os procedimentos do teste seguiram as especificações da Norma ASTM-E.8-84. A convenção de medidas de macro dureza da escala 15N para a escala Rockwell C foi feita de acordo com a Norma ASTM-

E-140-84. O valor apresentado nos resultados é o da média aritmética das dez medidas efetuadas.

Um dos métodos utilizados para a medida de adesão do revestimento, conforme a American Welding Society (AWS, 1985), é definido na Norma ASTM-D3359, “Standard Methods for Measuring Adhesion by Tape Test”, designado para revestimentos na faixa de adesão de até 6 MPa. Esse método consiste na marcação de um padrão com corte em “x” sobre o revestimento, sobreposto por uma fita adesiva posteriormente “arrancada” com um único golpe. Dependendo da área do material de revestimento destacada pela fita, a adesão é avaliada de forma qualitativa e feita de acordo com a norma, usando um estereoscópio com aumento de 10 vezes.

A fita adesiva utilizada nos testes foi a filamentososa SCOTH-880, da 3M, com 12 mm de largura e dorso de poliéster. A resistência à tração da fita era de 66,6 g/mm de largura. A norma exige uma resistência mínima de $40 \pm 2,8$ g/mm de largura. Os cortes (método "A" da norma) no revestimento foram

realizados com disco de corte de 1 mm de largura, em função da dificuldade de "riscar" o revestimento cerâmico com elementos cortantes. Um esquema da forma do corte é apresentado na figura 1. Esses testes foram realizados em seis corpos de prova, com espessuras e revestimentos variados.

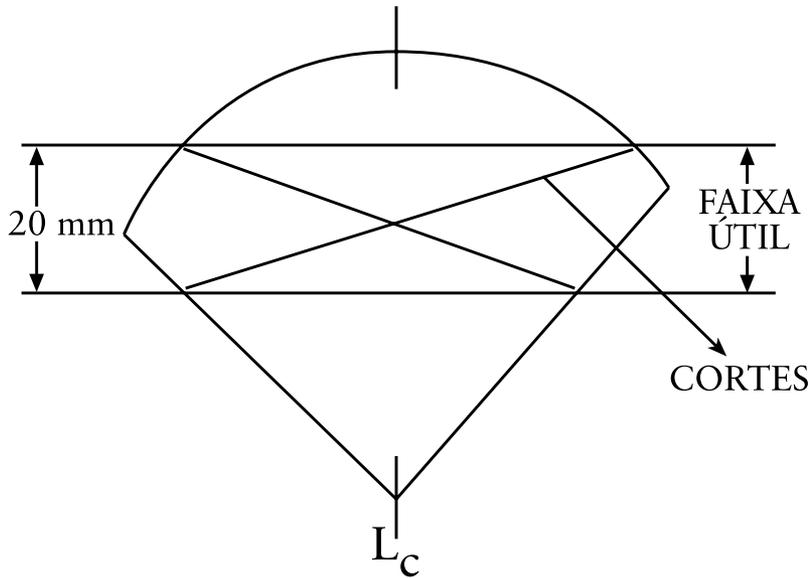


Fig. 1. Esquema de corte do revestimento para teste de adesão com fita.

O ensaio de adesão/coesão do revestimento foi feito de acordo com a norma ANSI-ASTM-633-79 (Adhesion or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings), a qual prevê a junção do corpo de prova com uma contraparte de mesmas dimensões em aço 1020. Para a junção, é utilizado um adesivo epoxi. Após a cura do adesivo, o conjunto montado é tracionado até que ocorra a separação. Avalia-se, então, a adesão do revestimento e a região da fratura. Para tanto, foi necessário confeccionar um dispositivo de compensação para os ensaios, conforme definido na norma, o qual é ilustrado na figura 2.

Os corpos de prova tiveram que sofrer usinagem para confecção de uma rosca interna em conformidade com o especificado na norma. Utilizou-se um adesivo epoxi Scotch Weld DP-460 (3M), de dois componentes, curado à temperatura ambiente. A resistência nominal ao cisalhamento do adesivo era de 4.500 psi (31 MPa). Os cilindros de aço 1020 eram posicionados verticalmente e aplicava-se na sua superfície o adesivo, usando-se aplicador e bico

misturado específico. A camada aplicada era de aproximadamente 2 mm de espessura. Em seguida, o corpo de prova era posicionado sobre o cilindro, concentricamente, mantido assim até a cura parcial (60 min). Com esse procedimento, garantia-se uma pressão na junção de $0,2 \text{ g/mm}^2$ (0,00196 MPa). O excesso lateral de adesivo escorria, por gravidade, da região da junta, não interferindo nos testes.

Os ensaios de tração eram realizados após 160 horas, garantindo a cura total do adesivo, e feitos em um equipamento Kratos, utilizando carga nominal de 3.000 kg e taxa de deslocamento de 0,02 mm/s.

Após o rompimento na região do revestimento/adeseivo, os corpos de prova e as contrapartes de aço eram separados e acondicionados para posterior análise da região de fratura. A carga máxima registrada era dividida pela área da seção transversal dos corpos de prova, para definição da resistência adesiva/coesiva. A análise da região de fratura era feita com o uso de um estereoscópio com aumento de até 50 vezes.

VISTA DA MONTAGEM

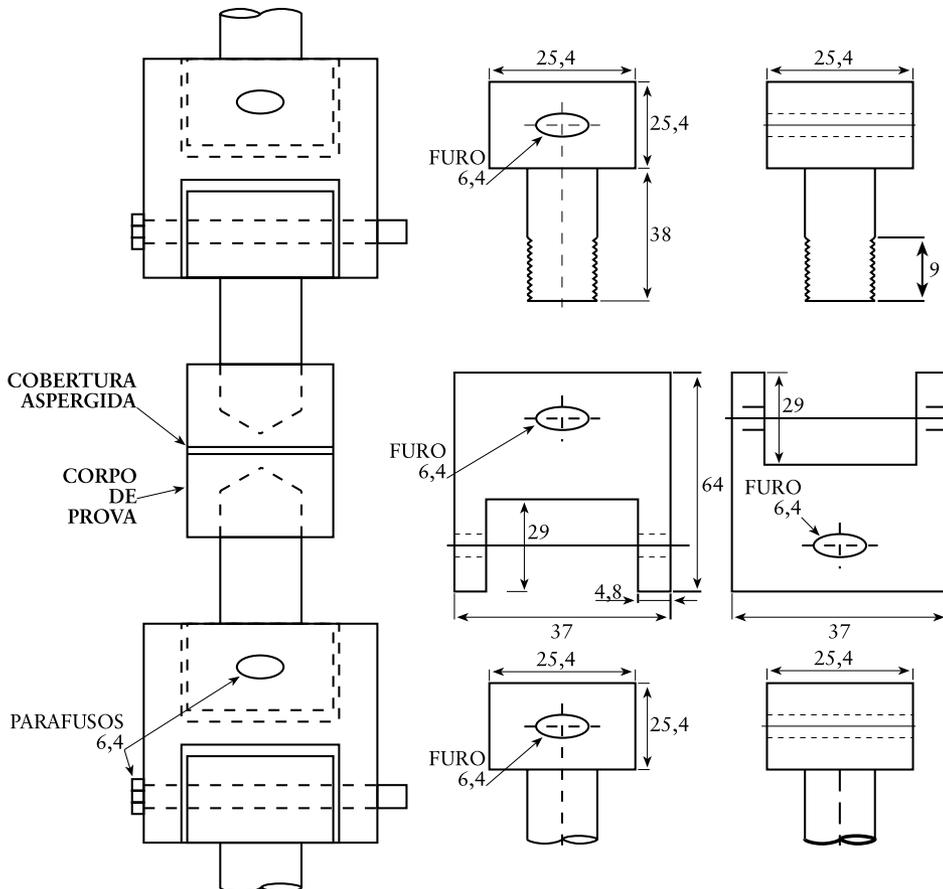


Fig. 2. Dispositivo de compensação para tracionamento no ensaio-ASTM-C633 (medidas em mm).

Fonte: ANSI/ASTM-C633-79.

Resultados e discussões

Dureza – Os gráficos apresentados a seguir mostram os resultados dos valores medidos de dureza superficial, categorizados pelo tipo de base utilizada (100-0, 25-75 ou 50-50) da espessura e do número de camadas aspergidas.

Para melhor visualização, os valores encontrados quanto à dureza superficial são apresentados de maneira comparativa por justaposição, para cada base, no gráfico da figura 3. Ele mostra os valores de dureza em função da espessura dos revestimentos. Pela análise da figura 3, pode-se perceber que existe uma tendência de aumento de dureza em função da espessura do revestimento, salvo onde possa ter

ocorrido influência de fatores de qualidade, ou seja, defeitos ou falhas no revestimento.

No gráfico da figura 4 é mostrada, também de maneira comparativa por justaposição, a influência do número de camadas nos valores de dureza registrados para cada revestimento. A análise desse gráfico mostra que a quantidade de camadas não tem influência significativa sobre o valor de dureza superficial, sendo preponderante, para iguais quantidades de camadas, a influência da espessura. O teste de dureza superficial Rockwell é o de macrodureza, geralmente usado em revestimentos aspergidos, sendo a carga de teste variável em função da espessura do revestimento (AWS, 1985).

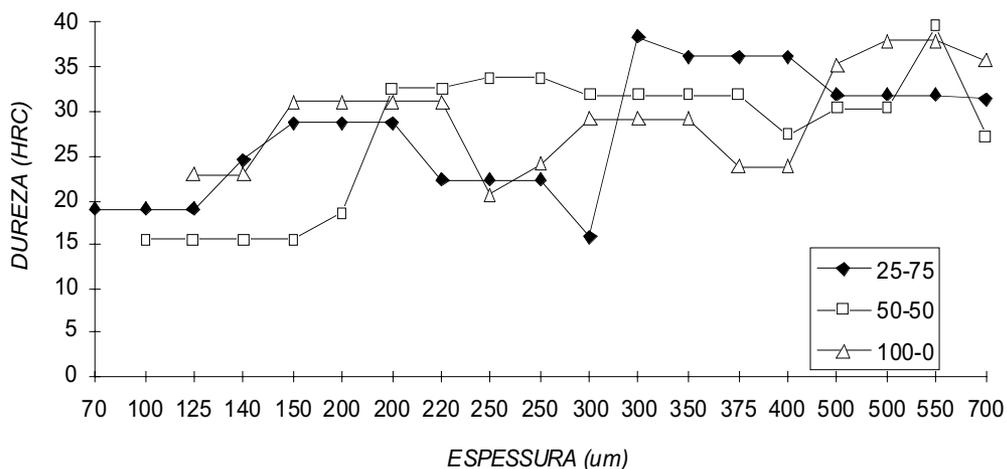


Fig. 3. Gráfico comparativo da dureza em função da espessura nominal.

Quando o revestimento não sofre acabamento superficial por usinagem ou esmerilhamento, o indentedor utilizado no teste pode posicionar-se em crateras ou picos inerentes ao perfil de rugosidade do revestimento. Por conseguinte, os valores medidos podem ter certa varia-

ção. É possível, dessa forma, justificar as diferenças nas medidas de dureza observadas nas figuras 3 e 4. Porém, na média, os valores medidos são válidos, principalmente para análises comparativas entre revestimentos com o mesmo nível de rugosidade.

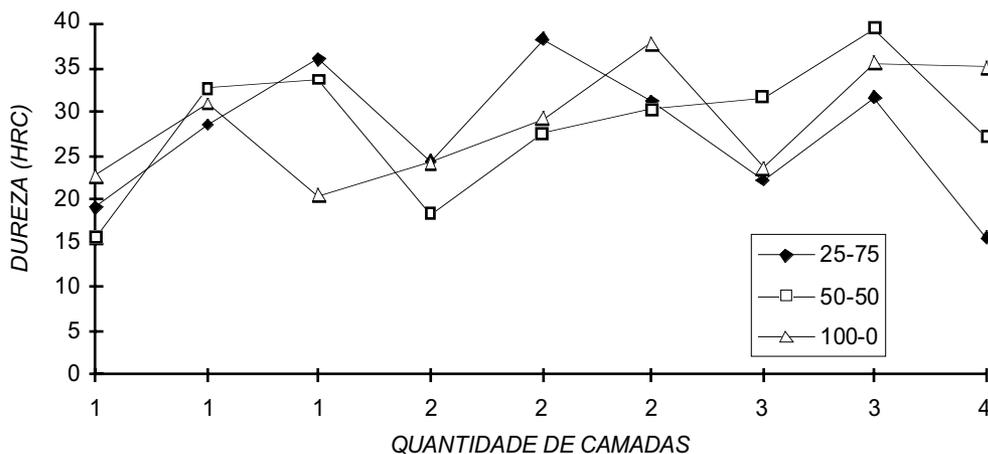


Fig. 4. Gráfico comparativo da dureza em função da quantidade de camadas.

Adesão – Adesão e a dureza são propriedades em geral muito importantes de revestimentos. Adesão é a mais desejável propriedade de um revestimento por aspersão térmica. Portanto, através dessas propriedades, procura-se avaliar a qualidade dos revestimentos obtidos.

O teste com fita (*Standard Methods for Measuring Adhesion by Tape Test*) foi aplicado como uma avaliação preliminar da condição dos revesti-

mentos obtidos nos experimentos. Após a aplicação do teste em seis corpos de prova, com espessuras e revestimentos variados, e visto não ter havido qualquer destacamento em nenhum dos corpos de prova, o teste foi considerado inadequado para o tipo de revestimento em questão.

O ensaio de adesão da norma ASTM-C633-79 é um dos indicados e mais utilizados para testar a adesão de revestimentos sobre substratos metálicos.

O modo de fratura dos revestimentos no teste pode ser adesivo (quando ocorre na interface do revestimento com o substrato) ou coesivo (quando ocorre dentro do revestimento). Se a fratura ocorre no interior do adesivo empregado no teste, o referido teste é considerado sem validade objetiva. Deve-se ressaltar que o valor medido de adesão é obtido pela carga de ruptura no ensaio dividida pela área da seção transversal testada. Portanto, o que se mede é a adesão prática e não a adesão básica, de acordo com Mittal (1978: 5-17). A adesão básica, conforme defendido por Steffens e colaboradores (1991), deve ser avaliada considerando-se o grau de cobertura de partículas após o ensaio de adesão (o que ficou no substrato).

Os resultados do ensaio de adesão são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 para cada tipo de base, separadamente. Os valores de espessura nominal e número de camadas são adicionados para facilitar a análise. Os resultados das análises realizadas sobre as superfícies de fratura dos corpos de prova cilíndricos, rompidos no ensaio de adesão, são, também, mostrados nas tabelas 2, 3 e 4, por tipo de base. A informação das tabelas é a localização da fratura no revestimento, sendo apontados apenas a região percentualmente mais afetada e este valor percentual, obtido por medição direta sobre a superfície fraturada. Visando uma melhor interpretação desses resultados, eles são também apresentados de maneira gráfica nas figuras 5 e 6.

Tabela 2. Análise local de fratura/valor de adesão – Base 25-75.

Nº CP	ESP.(µm)	Nº.CAM.	ADESÃO (MPa)	ANÁLISE LOCAL FRATURA
CP 09	70	1	19,5	Interface substrato-base – 80%
CP 12	300	4	14,0	Interface substrato-base – 50%
CP 16	150	1	31,3	Interface substrato-base – 60%
CP 18	500	3	16,8	Interface 1 ^a – 2 ^a camada – 50%
CP 22	350	1	12,7	Camada base – 70%
CP 23	700	2	11,7	Int.substr.-base – 40% / camada base 40%

Tabela 3. Análise local de fratura/valor de adesão – Base 50-50.

Nº CP	ESP.(µm)	Nº.CAM.	ADESÃO (MPa)	ANÁLISE LOCAL FRATURA
CP 01	200	1	20,89	Interface substrato-base – 90%
CP 04	700	4	8,82	Interface substrato -base – 60%
CP 19	100	1	12,5	Interface substrato-base – 80%
CP 21	300	3	13,5	Interface 2 ^a – 3 ^a camada – 50%
CP 24	250	1	17,9	Interface substrato-base – 70%
CP 25	500	2	19,4	Interface substrato-base – 70%

Tabela 4. Análise local de fratura/valor de adesão – Base 100-0.

Nº CP	ESP.(µm)	Nº.CAM.	ADESÃO (MPa)	ANÁLISE LOCAL FRATURA
CP 05	125	1	33,8	Interface substrato-base – 70%
CP 08	500	4	16,6	Interface 2 ^a – 3 ^a camada – 50%
CP 13	250	1	18,2	Adesivo epoxi
CP 15	700	3	30,43	Interface 1 ^a – 2 ^a camada – 80%
CP 26	150	1	38,7	Interface substrato-base – 60%
CP 27	300	2	36,11	Interface substrato-base -60%

O gráfico da figura 5 apresenta os resultados do teste de adesão em relação aos valores das espessuras medidas. Pela análise da figura 5, verifica-se

que, independentemente da espessura, os revestimentos com base 100-0 (100% metálica) apresentaram os maiores valores de adesão. A única exceção

ocorreu para a espessura na faixa de 550 μm (CP 08). A explicação para essa exceção encontra-se na tabela 4 (análise do local de fratura), na qual se observa que o corpo de prova, nessa faixa de espessura, rompeu na interface entre a 2ª e 3ª camadas, ou seja, a base não foi o fator limitante da adesão. O

mesmo ocorre para o valor de adesão do revestimento com base 100-0, na faixa de espessura de 300 μm (CP 13), observado na mesma figura, o qual corresponde a um corpo de prova cujo local de fratura do revestimento foi o adesivo epoxi utilizado no teste.

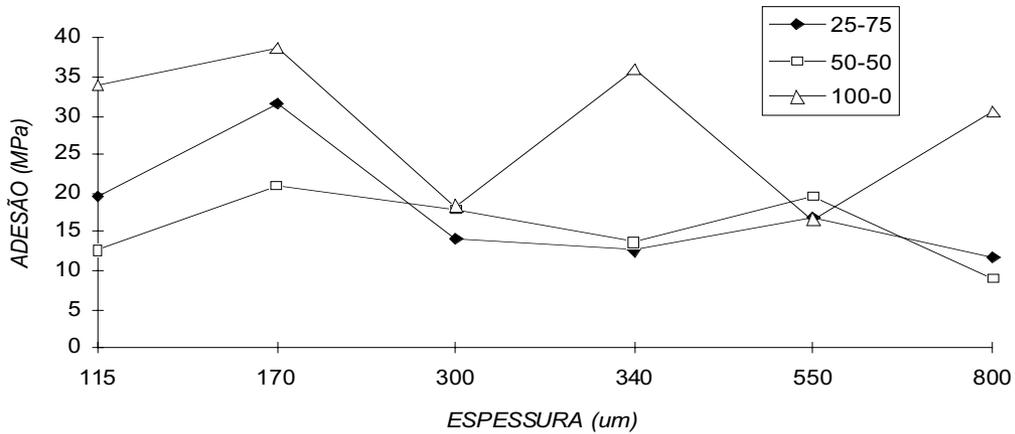


Fig. 5. Gráfico comparativo de adesão em função da espessura real.

Com o intuito de auxiliar a análise dos valores de adesão, a figura 6 apresenta, de forma gráfica, uma comparação entre os valores de adesão em função do número de camadas. Por facilidade de construção, assim como para eliminar dados não conclusivos, os valores referentes a revestimentos com uma camada foram tomados na espessura de valor intermediário, em cada tabela. A figura 6 mostra, com clareza, a tendência de diminuição de adesão quando do aumento da quantidade de camadas. Tal tendência não aparece

tão claramente em função da espessura (fig. 5), apesar de haver um certo consenso nesse sentido. O ponto no gráfico da figura 6 referente à base 25-75 com duas camadas, o qual se encontra em desacordo com a tendência presumida, foi o revestimento de maior espessura (700 μm), o que pode explicar o baixo valor de adesão. É importante salientar ainda que o aumento da quantidade de camadas no gráfico apresentado não corresponde, necessariamente, a um aumento de espessura.

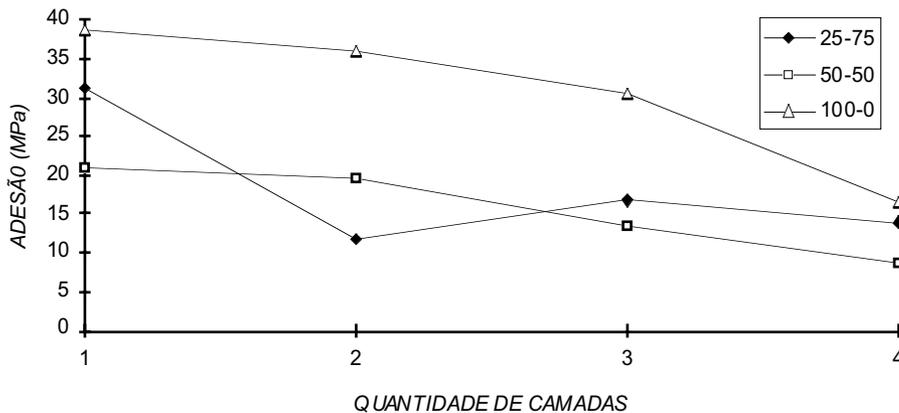


Fig. 6. Gráfico comparativo de adesão em função da quantidade de camadas.

Analisando as figuras 5 e 6, pode-se observar que o aumento da espessura e, concomitantemente, o aumento do número de camadas são prejudiciais à adesão. Vários autores utilizam testes de adesão padronizados e normalizados e outros utilizam ou propõem testes diversos para avaliação da adesão de revestimentos. Andritschky e colaboradores (1994) avaliam revestimentos de zircônia estabilizada, usando um teste de penetração (*scratch test*). O mesmo teste é empregado por Das e colaboradores (1991) em revestimentos similares. Sexsmith e Troczynski (1994) adotam um teste de descascamento (*peel test*), similar ao da norma ASTM-D3167, para medir as variações de adesão de revestimentos de óxido de cromo.

Meterns-Lecomte e colaboradores (1994) e Dallaire e colaboradores (1992) utilizam o ensaio da norma ASTM-C633-79, caracterizando satisfatoriamente os distintos revestimentos aspergidos usados para barreira térmica. Greving e colaboradores (1994), empregando o ensaio C-633 como referência, fazem uma alteração no comprimento do corpo de prova, que passa de 25,4 mm para 38,1 mm, com o objetivo de facilitar a utilização dos conceitos de mecânica de fratura na análise e na avaliação da adesão de revestimentos de níquel-alumínio. Leigh e colaboradores (1994) executam o teste da norma C-633 com modificações (denominado Single Bar- SB), o qual permite acomodar amostras largas e achatadas de até 152 x 152 x 152 mm, fixadas por adesivo somente na parte inferior, ficando posicionada entre duas juntas universais, auto-alinhadas. Uma deficiência desse sistema proposto pode estar na falta de simetria do sistema montado, levando a variações entre as tensões reais sobre o revestimento e as tensões determinadas no tracionamento.

Avaliando a influência da rugosidade sobre a aderência de revestimentos cerâmicos aplicados por plasma sobre substratos cerâmicos, Bergmann (1994) utiliza o teste de flexão em três pontos e conceitos da mecânica de fratura para determinação da adesão. Weiss (1995) discute em seu trabalho que os testes normalizados para os ensaios de adesão, como no caso aqui estudado, ficam limitados pela resistência adesiva do ligante (adesivo), enquanto o teste de cisalhamento (*shear test*) não apresenta essa limitação. Porém, o de cisalhamento apresenta como fator limi-

tante a espessura do revestimento, que, por razões de posicionamento, deve ter, no mínimo, 70 mm. Propondo um novo teste de cisalhamento, baseado no padronizado pela norma DIN-50161, com geometria modificada, Grütznier e Weiss (1991) concluem que o deles apresenta algumas desvantagens ou problemas, entre os quais o fato de que o revestimento não é carregado uniformemente, fazendo com que o resultado dependa da altura da amostra. Pelo exposto, pode-se observar a grande dificuldade de comparar resultados ou validar sistemas e métodos apresentados pelos diversos autores, como observado também por Suganuma e colaboradores (1988).

No presente estudo, as análises executadas sobre as superfícies fraturadas obtidas no ensaio de adesão e, posteriormente, as avaliações por microscopia e difração de raios X mostraram que os resultados de adesão e dureza conseguidos nos testes são coerentes, em cada tipo de base e situação específica de espessura e quantidade de camadas. Na execução dos ensaios/preparativos, verificou-se que a observação de todas as recomendações ou exigências da norma é fundamental para a validação dos resultados. Porém, as lacunas existentes dizem respeito à não-especificação objetiva da forma de aplicação do adesivo, a ser utilizado para união dos corpos de prova no ensaio de adesão, evitando incorreções e/ou a invalidação dos resultados, caso ocorra falha no adesivo, e não no revestimento. Pelo que é possível avaliar nos ensaios, a aplicação de pressões variadas durante a “colagem” pode interferir nos resultados, o que também não é definido pela norma.

Outro fator de extrema importância, observado no teste de adesão, é o alinhamento rigoroso do sistema dispositivo de fixação (fig. 2) – garras do equipamento de tração. Qualquer desvio pode levar a incorreções de resultados pela aplicação diferenciada da carga pela área da seção transversal do revestimento. Tal detalhe também não recebe nenhuma consideração na referida norma. Observados todos esses pormenores e cuidados nos experimentos aqui realizados, apenas um corpo de prova teve fratura no adesivo, descaracterizando a resistência efetiva do revestimento. Nos demais casos, houve coerência nos resultados obtidos. Quanto aos ensaios de dureza, a grande preocupação deve ser com o nível de rugosi-

dade superficial, em relação ao tipo de indentador utilizado no teste.

Conclusões

O desenvolvimento do presente trabalho permite, através da análise e dos resultados obtidos, formular as seguintes conclusões:

- O teste de dureza mostra que os resultados só podem ser comparados se as superfícies tiverem o mesmo nível de rugosidade, pois o indentador usado no ensaio pode posicionar-se em crateras ou picos inerentes ao perfil de rugosidade do revestimento que, conseqüentemente, afeta os valores medidos.
- O ensaio de adesão referido na norma ASTM-C633-79 mostrou-se adequado para medidas de adesão de revestimentos obtidos por aspersão térmica a plasma.
- Para avaliação da adesão dos revestimentos e comparação entre resultados obtidos por diferentes processos, é necessário que sejam adotados referenciais padronizados e normalizados para diferentes materiais e condições de aplicação, minimizando a influência de fatores aleatórios.
- Visto não ter havido qualquer destacamento em nenhum dos corpos de prova, o teste de adesão com fita foi considerado inadequado para o tipo de revestimento em questão.
- O desenvolvimento de novos métodos e testes, considerado importante, deve permitir reprodutibilidade e facilidade de aplicação, aliadas a baixo custo, sem o que estará fadado a pouco uso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, pelo financiamento do projeto de pesquisa, e a Motores Rolls-Royce Ltda., pela cessão dos equipamentos e instalações para execução dos revestimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRITSCHKY, M.; REBOUTA, L. & TEIXEIRA, V. Corrosion and adherence of stabilized ZrO₂ coatings at high temperatures. *Surface and Coatings Technology*, v. 68/69, pp. 81-85, 1994.
- AWS *Thermal Spraying – Practice, Theory and Applications*. American Welding Society: Miami, Florida, 1985, 184 p.
- BERGMAN, C.P. Influence of the substrate roughness on the adherence of plasma sprayed ceramic coatings. *In: National Thermal Spray Conference, 1994, Boston, Massachusetts. Proceedings*, Massachusetts: AWS, 1994. pp. 683-686.
- BILÃO, T. & TREVISAN, R.E. Influência da Camada de base de Ni-Al nas propriedades de revestimentos depositados por aspersão térmica a arco. *In: XXIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, São Paulo, SP. 1997. V. 1, pp. 261-270.*
- DALLAIRE, S.; ARSENAULT, B. & DESANTIS, A. Investigation of selected plasma-sprayed coatings for bonding glass to metal in hermetic seal applications. *Surface and Coatings Technology*, v. 53, pp. 129-135, 1992.
- DAS, D.K. et al. Scratch adhesion testing of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coating. *Surface and Coating Technology*, v. 46, pp. 331-345, 1991.
- GREVING, D.J.; SHADLEY, J.R. & RYBICKI, E.F. Effects of coating thickness and residual stresses on bond strength of C633-79 Thermal spray coating test specimens. *In: National Thermal Spray Conference, 7th, June 1994, Boston, Massachusetts. Proceedings...* Massachusetts: AWS, 1994. pp. 639-645.
- GRÜTZNER, H. & WEISS, H. A novel shear test for plasma-sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 45, pp. 317-323, 1991.

- LEIGH, S.H. *et al.* Tensile adhesion testing of thermal spray coatings on flat substrates. *In: National Thermal Spray Conference, 1994, Boston, Massachusetts. Proceedings, Massachusetts: AWS, 1994. pp. 655-662.*
- LIMA, C.R.C. & TREVISAN, R.E. Análise da correlação dos resultados de ensaios de adesão em revestimentos obtidos por aspersão térmica a plasma. *In: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Blumenau, SC, 1996, v. 2, pp. 557-567.*
- MARANHO, O. Influência da preparação da superfície na aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica a chama. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996, p. 46.
- METERNS-LECOMTE, C.; MUCK, D. & GARCIA, J. Characterization of a new aerospace thermal barrier coating. *In: National Thermal Spray Conference, 7th, June 1994, Boston-Massachusetts. Proceedings... Massachusetts: AWS, 1994. pp. 61-65.*
- MITTAL, K.L. Adhesion measurement: recent progress, unsolved problems and prospects. *Astm Special Technical Publication, 640, American Society and Materials, 1978, pp. 5-17.*
- SEXSMITH, M. & TROCZYNSKI, T. The variations in coating properties across a spray pattern. *In: National Thermal Spray Conference, 7th, June, Boston-Massachusetts. Proceedings... Massachusetts: AWS, 1994. pp. 751-757.*
- STEFFENS, H.D.; WIELAGE, B. & DROZAK, J. Interface phenomena and bonding mechanism of thermally-sprayed metal and ceramic composites. *Surface and Coating Technology, v. 45, n. 1-3, pp. 299-308, May 1991.*
- SUGANUMA, K.; MYIAMOTO, Y. & KOIZUMI, M. Joining of ceramic and metals. *Ann. Rev. Mater. Sci. V. 18, pp. 47-73, 1988.*
- WANG, Y. Friction and wear performances of detonation-gun and plasma-sprayed ceramic and cermet hard coatings under dry friction. *Wear, n. 161, pp. 69-78, 1993.*
- WEISS, H. Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment. *Surface and Coatings Technology, v. 71, n. 2, pp. 201-207, mar./1995.*

