

# INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO NA RESISTÊNCIA A EROSÃO DO RECOBRIMENTO DE ZIRCÔNIA-ÍTRIA

**Sérgio João Crnkovic<sup>1</sup>**

Professor Doutor do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT)

Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

[crnkovic@feg.unesp.br](mailto:crnkovic@feg.unesp.br)

**Marcelo Bondioli<sup>2</sup>**

Mestre em Engenharia Mecânica, aluno do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT)

Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

**Rogério Lago Mazur<sup>3</sup>**

Engenheiro Mecânico, aluno do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica

Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

[rogermaz@uol.com.br](mailto:rogermaz@uol.com.br)

**Humberto Lopes Rodrigues<sup>4</sup>**

Mestre em Engenharia Mecânica, Tecnólogo do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT)

Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

[humberto@feg.unesp.br](mailto:humberto@feg.unesp.br)

## RESUMO

*Os recobrimentos cerâmicos aplicados por diversos processos de deposição em componentes mecânicos, além de possuírem excelentes combinações de alta dureza, alta resistência e excepcional estabilidade química, têm demonstrado aumentar a resistência a erosão por partícula sólida em meio fluido em relação aos materiais metálicos utilizados. Utilizando-se uma configuração de teste de erosão por partícula sólida do tipo jato de impacto, foi analisado o comportamento do recobrimento cerâmico a base de zircônia-ítria, depositado por aspersão térmica de plasma, sobre substratos de aço e latão. Os resultados quantitativos da taxa de erosão e as observações microscópicas por microscopia óptica e eletrônica de varredura, mostram um melhor desempenho do substrato de latão, sendo que este fato, relaciona-se a uma maior deformação plástica do substrato de aço, próximo a interface do recobrimento.*

**Palavras chave:** Erosão, Recobrimento cerâmico, Aspersão térmica.

## 1. INTRODUÇÃO

O impacto de fluxos líquidos contendo partículas sólidas em altas velocidades, produzem a remoção de material da superfície por repetidos impactos das partículas por um processo de desgaste denominado erosão (Lathabai *et* Pender, 1995; Zhao *et* al., 1995) e tem limitado a vida de muitos componentes mecânicos, tais como, pás de bombas, válvulas, tubos de transporte, hidrociclones, no transporte de minerais em indústrias de mineração, etc (Lathabai *et* Pender, 1995;

Zhao *et al.*, 1995 e Fang *et al.*, 1999). Este tipo de desgaste contribui com 8% entre todos os tipos de desgaste que ocorrem em máquinas e equipamentos mecânicos (Xia *et al.*, 1999).

Estudos iniciais sobre erosão por partículas sólidas em meio líquido (Finnie, 1960) indicaram que é um fenômeno complexo que envolve parâmetros relativos ao material, químicos e mecânicos, sendo que, os parâmetros mais importantes derivam do fluido das partículas de erosão e do material da amostra. Os parâmetros relativos ao fluido incluem viscosidade, densidade e reatividade química (Lathabai *et Pender*, 1995), em relação às partículas, forma e tamanho, ao fluxo, velocidade e ângulo de impacto e ao material, microestrutura, tenacidade e dureza (Fang *et al.*, 1998).

Há uma demanda industrial para materiais adequados que resistam com eficiência a erosão por partícula sólida em meio líquido (Fang *et al.*, 1998) e os materiais cerâmicos são atrativas opções devido a sua combinação de propriedades, tais como, dureza, alta temperatura de fusão e alto nível de inércia química (Zhao *et al.*, 1995; Fang *et al.*, 1999; Fang *et al.*, 1998; Lathabai *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 1999). Avanços no entendimento do comportamento a erosão e dos mecanismos erosivos dos materiais cerâmicos tem sido feitos recentemente, entretanto, o entendimento em meio líquido não se encontra bem esclarecido (Fang *et al.*, 1999). Em relação aos parâmetros importantes no desgaste erosivo, tem-se sido observado o aumento linear do volume removido com o tempo de erosão (Lathabai *et Pender*, 1995 e Fang *et al.*, 1999) e um aumento da taxa de desgaste com o aumento do ângulo de impacto do fluxo (Lathabai *et Pender*, 1995 e Zhao *et al.*, 1999) e um aumento com o tamanho das partículas erosivas e sua concentração, entretanto, o principal parâmetro que controla a remoção de material do cerâmico é a sua microestrutura (Lathabai *et Pender*, 1995). É geralmente aceito que o material da superfície é removido por intersecção de trincas produzidas pelos impactos das partículas erosivas (Fang *et al.*, 1999), associados a mecanismos de desgaste por deformação plástica e fratura frágil (Fang *et al.*, 1999 e Fang *et al.*, 1998).

Recentemente, as novas tecnologias de deposição superficial de cerâmicos sobre substratos metálicos tem recebido a atenção em relação ao seu potencial na aplicação de componentes mecânicos sujeitos a erosão (Zhao *et al.*, 1995; Fang *et al.*, 1999), pois os pontos fracos dos materiais metálicos e dos cerâmicos depositados são compensados (Zhao *et al.*, 1999-2), entretanto, os métodos de deposição superficial tem apresentado problemas relativos a fraca aderência das camadas depositadas aos substratos, devido as grandes diferenças nos coeficientes de expansão térmica (Zhao *et al.*, 1995; Lathabai *et al.*, 1998). A microestrutura lamelar produzida pelo processo de deposição de cerâmico por aspersão térmica de plasma é altamente defeituosa com interfaces fracas e vazios entre lamelas, material incidente não fundido e trincas (Lathabai *et al.*, 1998 e Zhao *et al.*, 1999). A utilização de pré recobrimentos adequados sobre o substrato demonstrou uma melhora na adesão do recobrimento cerâmico (Zhao *et al.*, 1999).

As taxas de erosão dos recobrimentos cerâmicos tem demonstrado aumentar exponencialmente com a velocidade de impacto da partícula erosiva e mudanças dos mecanismos de desgaste tem sido observados, de baixas para altas velocidades (Lathabai *et al.*, 1998). A influência da microestrutura e morfologia do recobrimento sobre o comportamento a erosão tem sido reconhecida (Xia *et al.*, 1999 e Lathabai *et al.*, 1998), enquanto que, a dureza não tem demonstrado possuir alguma correlação (Lathabai *et al.*, 1998) e o volume de material removido por erosão tem demonstrado ser linear com o tempo de impacto (Zhao *et al.*, 1995; Fang *et al.*, 1999 e Lathabai *et al.*, 1998), enquanto que o mecanismo de desgaste erosivo se processa por fratura nos limites das lamelas quando há pobres ligações na estrutura ou fratura das lamelas, microfratura e deformação plástica quando a coesão entre as lamelas é melhorada (Lathabai *et al.*, 1998).

O objetivo deste trabalho é analisar a influência do substrato sobre o desgaste erosivo do recobrimento cerâmico a base de Zr-Y depositado por aspersão térmica de plasma, avaliando-se as características da estrutura do depósito cerâmico por aspersão térmica de plasma, o endurecimento subsuperficial do substrato e morfologia da superfície desgastada.

## 2. MATERIAIS e MÉTODOS

O recobrimento cerâmico depositado por aspersão térmica de plasma sobre os substratos de aço e latão é constituído de um pó comercial (METCO 204 NS) composto de 92% de zircônia e 8% de ítria, com granulometria na faixa de 106 a 140 mesh, densidade de 5,4 g/cm<sup>3</sup> e ponto de fusão de 2480 °C. A composição química em peso e as propriedades mecânicas do aço ABNT-1010 e latão utilizados como substratos do recobrimento cerâmico, são respectivamente ilustrados pelas tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** – Composição química em peso e propriedades mecânicas do substrato de aço ABNT 1010.

Composição Química em peso	Propriedades Mecânicas
0,08% C, 0,01% Si, 0,40% Mn, 0,018% P, 0,016% S, 0,02% Ni, 0,01% Mo, 0,01% Cu e 0,004% Al	Tensão de Escoamento : 216 MPa Limite de Resistência a Tração : 324 MPa Dureza : 105,1 Hv Ductilidade, % de Alongamento (em 50mm) : 28

**Tabela 2** – Composição química em peso e propriedades mecânicas do substrato de latão.

Composição Química em peso	Propriedades Mecânicas
55% Zn e 45% Cu	Tensão de Escoamento : 77 MPa Limite de Resistência a Tração : 310 MPa Dureza : 135,5 Hv Ductilidade, % de Alongamento (em 50mm) : 68

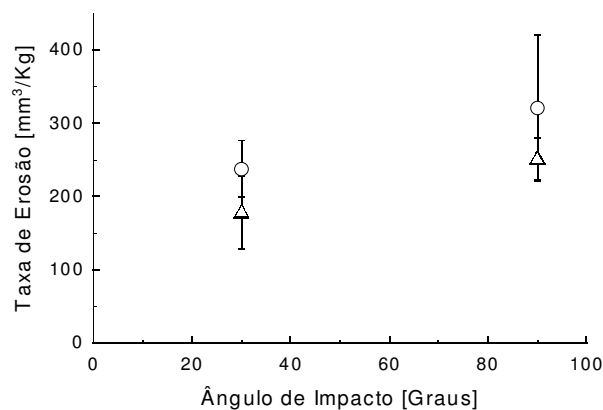
As superfícies de recebimento do depósito de material cerâmico nos substratos de aço e latão foram inicialmente preparadas por um lixamento seletivo, na seqüência de granas 100, 220 e 320, com posterior jateamento por partículas de alumina que proporcionou uma rugosidade Ra em torno de 5µm. O depósito do recobrimento por aspersão térmica de plasma sobre a superfície do substrato devidamente preparada, foi realizado por uma pistola da marca METCO modelo 3MBII com parâmetros de deposição de tensão de 450 V e 65 A, a uma distância de aplicação de aproximadamente 100mm.

Os ensaios de erosão por partículas sólidas em meio aquoso foram realizados em um dispositivo de testes do tipo jato de impacto, na temperatura ambiente (22°C), em ângulos de impacto do fluxo de 30 e 90°, com velocidade de 2m/s e quantidade de areia de 20g. As partículas sólidas de areia, devidamente selecionadas no fluxo aquoso, possuíam uma granulação na faixa de 149 a 297µm e densidade de 2,59g/cm<sup>3</sup>. A taxa de desgaste do recobrimento em [mm<sup>3</sup>/Kg] foi determinada pela relação entre o volume de material removido por erosão antes e após os ensaios e a quantidade de areia impactada, sendo que, apenas o recobrimento foi sujeito ao desgaste erosivo.

As micrografias ópticas e medidas de microdureza em uma secção transversal do recobrimento foram realizadas em um microscópio Neophot 30, enquanto que, as micrografias da superfície sem e com desgaste erosivo e as secções transversais das crateras de erosão foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura em um microscópio JEOL, modelo JXA 840A Electron Probe Microanalyser.

### 3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

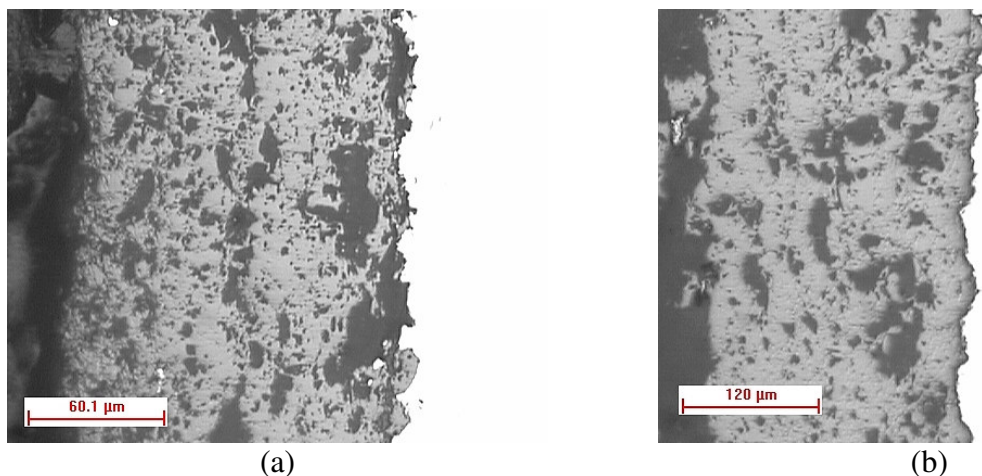
A figura 1, ilustra o comportamento da taxa de desgaste [mm<sup>3</sup>/Kg] do recobrimento cerâmico depositado sobre os substratos de aço e latão, para um nível de confiança de 95%.



**Figura 1 – Comportamento da taxa de desgaste do recobrimento cerâmico com o ângulo de impacto do fluxo: (o) substrato de aço, (Δ) substrato de latão.**

Observa-se na figura 1, que a taxa de desgaste por erosão do recobrimento cerâmico depositado sobre os substratos de aço e latão mantêm-se dentro de níveis equiparáveis, entretanto, baseando-se na análise estatística da média destes valores para um nível de confiança de 95 %, verifica-se que a taxa de desgaste cresce com o ângulo de impacto do fluxo aquoso e que a taxa de desgaste do recobrimento cerâmico sobre o substrato de latão é menor do que aquela apresentada pelo recobrimento sobre o substrato de aço. O crescimento da taxa de erosão do recobrimento cerâmico depositado sobre substratos de aço tem sido observado (Lathabai *et* Pender, 1995 e Zhao *et* al., 1999), entretanto, o aumento na faixa de ângulos de impacto do fluxo de 30 a 90°, depende do tipo de recobrimento cerâmico e do método de deposição do recobrimento.

As figuras 2a e 2b, ilustram respectivamente a micrografia óptica da secção transversal do recobrimento cerâmico-substrato de aço (Fig.2a) e recobrimento cerâmico-substrato de latão (Fig.2b).

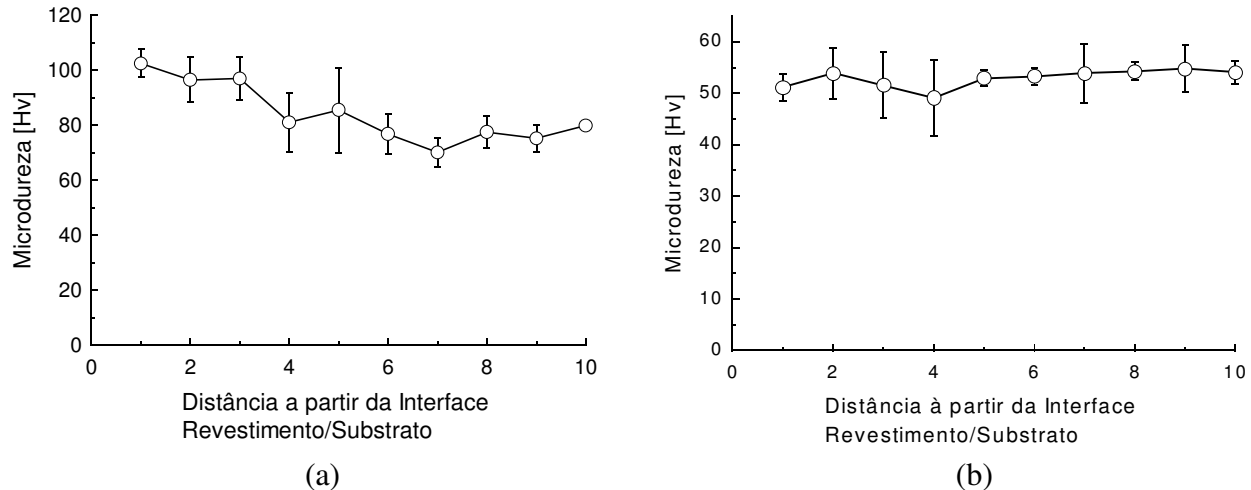


**Figura 2 - Micrografia óptica da secção transversal do recobrimento cerâmico-substrato: (a) Aço, (b) Latão**

Observando-se a Micrografia óptica da secção transversal do recobrimento cerâmico-substrato de aço (Fig.2a), verifica-se a intensa presença de vazios ao longo de toda secção transversal do recobrimento cerâmico e na interface com o substrato de aço, sendo que características similares são observadas na secção transversal do recobrimento cerâmico-substrato de latão (Fig.2b). Destas observações, constata-se as fracas aderências aos substratos em razão das grandes diferenças dos coeficientes de expansão térmica do material cerâmico - substrato (Zhao *et*

al., 1995 e Lathabai *et al.*, 1998) e a deficiência do processo de aspersão térmica de plasma que produz uma fraca aderência entre as lamelas sobrepostas e uma alta quantidade de vazios (Lathabai *et al.*, 1998 e Zhao *et al.*, 1999).

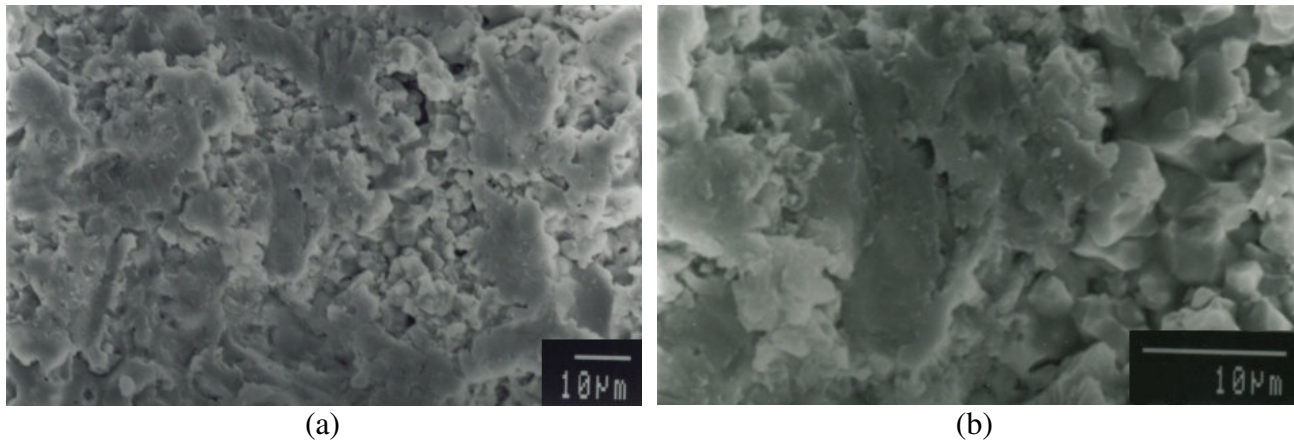
As figuras 3a e 3b, ilustram respectivamente a microdureza do substrato abaixo da interface do recobrimento cerâmico-substrato de aço (Fig.3a) e recobrimento cerâmico-substrato de latão (Fig.3b), para um ângulo de impacto de 90° do fluxo aquoso .



**Figura 3 - Microdureza do substrato na secção transversal da cratera de erosão, para um ângulo de impacto do fluxo aquoso de 90°: (a) Aço, (b) Latão.**

Observa-se um decréscimo da microdureza com 95 % de nível de confiança no substrato de aço em direção oposta a interface com o recobrimento cerâmico (Fig.3a), enquanto que, no substrato de latão a mesma mantém-se praticamente constante.

As figuras 4 e 5, ilustram respectivamente a superfície desgastada do recobrimento cerâmico por erosão para um ângulo de impacto de 90°, próximo ao centro da cratera erodida.

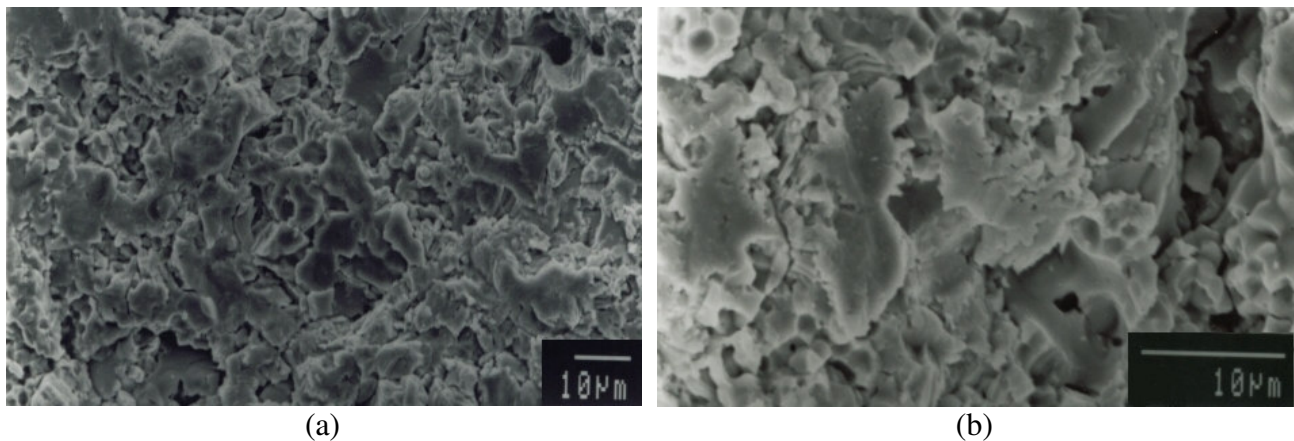


**Figura 4 - (a) Micrografia da superfície desgastada por erosão do recobrimento cerâmico sobre substrato de aço, (b) Detalhe, para um ângulo de impacto de 90°.**

A superfície desgastada do recobrimento cerâmico sobre o substrato de aço (Fig.4a) para um ângulo de impacto de 90°, apresenta uma morfologia composta de lamelas, características do depósito por aspersão térmica de plasma, em certos locais deformados plasticamente, trincas aparentes sobre a superfície e significativa quantidade de fragmentos destas lamelas entre lamelas adjacentes. Uma vista da região entre lamelas (Fig.4b) mostra fragmentos de lamelas de diversos

tamanhos e a curvatura de uma lamela deformada plasticamente pelos impactos das partículas erosivas. Para as mesmas condições de erosão mas para o recobrimento cerâmico sobre o substrato de latão (Fig.5a), a morfologia composta de lamelas apresenta-se de dimensões inferiores às aquelas em substrato de aço, apresenta trincas sobre a superfície das lamelas e cavidades aleatoriamente distribuídas sobre toda a superfície desgastada. Uma região desta superfície desgastada (Fig.5b), mostra lamelas deformadas plasticamente.

Destas observações, verifica-se que uma maior erosão por partícula sólida em meio aquoso do recobrimento cerâmico de Zr-Y sobre substrato de aço (Fig.1) para um ângulo de impacto de 90°, relaciona-se ao endurecimento subsuperficial do substrato em aço produzido pelo impacto das partículas erosivas, conforme mostra a elevação da microdureza próximo a interface do recobrimento - substrato (Fig. 3) . Um substrato em aço mais duro próximo a interface com o recobrimento cerâmico, absorve menos energia do impacto das partículas incidentes, e portanto, uma maior parcela da energia de impacto é concentrada nas lamelas, produzindo deformação plástica e uma maior fratura (Fig. 4a e 4b), favorecida pelos vazios proporcionados pela imperfeição do processo de deposição por aspersão térmica de plasma (Fig. 2a e b).



**Figura 5 - (a) Micrografia da superfície desgastada por erosão do recobrimento cerâmico sobre substrato de latão, (b) Detalhe, para um ângulo de impacto de 90°.**

#### **4. CONCLUSÕES**

Dos resultados obtidos pode-se concluir que o desgaste erosivo por partícula sólida em meio aquoso do recobrimento cerâmico a base de Zr-Y apresenta um maior desgaste quando depositado sobre um substrato de aço. Este fato relaciona-se ao endurecimento subsuperficial do substrato de aço que proporciona uma maior energia de impacto sobre as lamelas do material cerâmico, a formação de vazios e a fraca aderência interfacial induzida pelo processo de aspersão térmica de plasma, produzindo um mecanismo de desgaste severo por microfratura e deformação plástica das lamelas.

#### **5. REFERÊNCIAS**

- Lathabai, S., Pender, D.C., 1995, “Microstructural Influence In Slurry Erosion of Ceramics”. Wear, Vol. 189, pp. 122-135.
- Zhao, H.X., Yamamoto, M., Matsumura, M., 1995, “Slurry Erosion Properties of Ceramic Coatings And Functionally Gradient Materials”, Wear, Vol. 186-7, pp. 473-479.
- Xia, Z., Zhang, X., Song, J., 1999, “Erosion-Resistance of Plasma Sprayed Coatings”, Journal of Materials Engineering And Performance, Vol.8, pp. 716-718.
- Fang, Q., Xu, H., Sidky, P.S., Hocking, M.G, 1999 “Erosion of Ceramic Materials by a Sand/Water Slurry Jet”, Wear, Vol. 224, pp. 183-193.



- Finnie, I, 1960, "Erosion of Surfaces by Solid Particles", Wear, Vol. 3, pp. 87-103.
- Fang, Q., Sidky, P.S., Hocking, M.G, 1998, "Microripple Formation and Removal Mechanism of Ceramic Materials by Solid-Liquid Slurry Erosion", Wear, Vol. 223, pp. 93-101.
- Lathabai, S., Ottmüller, M., Fernandez, I., 1998, "Solid Particle Erosion Behaviour Of Thermal Sprayed Ceramic, Metallic And Polymer Coatings", Wear, Vol. 221, pp. 93-108.
- Zhao, H.X., Goto, H., Matsumura, M., Takahashi, T., Yamamoto, M., 1999, "Slurry Erosion Of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings", Surface And Coatings Technology, Vol. 115, pp. 123-131.
- Zhao, H.X., Yabuki, A., Matsumura, M., Takahashi, T., Yamamoto, M., 1999, "Slurry Erosion Properties of Ceramics Coatings", Wear, Vol. 233-235, pp. 608-614.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

### INFLUENCE OF SUBSTRATE IN THE EROSION RESISTANCE OF ZIRCONIA-YTTRIA COATING

**Sérgio João Crnkovic<sup>1</sup>**

Department of Materials and Technology (DMT)  
Campus of Guaratinguetá - São Paulo State University (UNESP)  
[crnkovic@feg.unesp.br](mailto:crnkovic@feg.unesp.br)

**Marcelo Bondioli<sup>2</sup>**

Department of Materials and Technology (DMT) - Postgraduation Student in Mechanical Engineering  
Campus of Guaratinguetá - São Paulo State University (UNESP)

**Rogério Lago Mazur<sup>3</sup>**

Department of Materials and Technology (DMT) - Postgraduation Student in Mechanical Engineering  
Campus of Guaratinguetá - São Paulo State University (UNESP)  
[rogermaz@uol.com.br](mailto:rogermaz@uol.com.br)

**Humberto Lopes Rodrigues<sup>4</sup>**

Department of Materials and Technology (DMT) - Postgraduation Student in Mechanical Engineering  
Campus of Guaratinguetá - São Paulo State University (UNESP)  
[humberto@feg.unesp.br](mailto:humberto@feg.unesp.br)

## ABSTRACT

*The ceramic coatings applied by many deposition processes in mechanical parts, apart from have excellent combinations of high hardness, strength and excellent chemical stability, had showed increase the slurry erosion resistance concerned with the metallic metals used. Using an erosion test by impact jet of solid particles, was analyzed the behaviour of a thermal plasma-spray zirconia-yttria ceramic coating deposited on steel and brass substrate. The quantitative result of erosion rate and the microscopic observations by optical and scanning microscopy showed a better performance of brass substrate. This fact is corresponding with a stronger plastic deformation of the steel substrate, near of the coating interface.*

**Keywords.** Erosion, Ceramic coating, Thermal spray.