

Avaliação do Desgaste Erosivo à Quente (~300°C) por Cinzas de Carvão Mineral em Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica

J. Vicenzi, D. L. Villanova, M. D. Lima, A. S. Takimi, C. M. Marques, C. P. Bergmann, LACER -UFRGS

RESUMO

A cinza volante, resultante da queima do carvão mineral empregado na geração de energia elétrica, é responsável por problemas de desgaste erosivo intenso e localizado em estruturas e equipamentos. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar alternativas via Engenharia de Superfícies, que permitam um aumento da vida útil e uma melhor performance dos equipamentos em serviço. Neste trabalho, revestimentos obtidos por aspersão térmica empregando a técnica de HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), foram testados sob condições de desgaste erosivo a quente. Para tanto, foi desenvolvido um aparato que permitiu os ensaios de desgaste a cerca de 310°C. Foram ensaiados, o aço SAE 1020, como material base e padrão de comparação, e três revestimentos aspergidos por HVOF: WC-12Co, Cr₂C₃-NiCr e WC-CrC-Ni. Como material erosivo, foi empregada a própria cinza volante gerada na queima de carvão mineral.

PALAVRAS-CHAVES

Revestimentos aspergidos, desgaste erosivo, cinza de carvão.

I. INTRODUÇÃO

O carvão mineral é utilizado em usinas termoeletricas como combustível na geração de energia elétrica. Além da energia, a queima do carvão mineral gera um alto teor de cinzas, responsáveis por problemas de desgaste intensos e localizados. O desgaste mais frequente neste tipo de aplicação é o erosivo, devido à agressão de partículas sólidas em um fluido a uma superfície. O desgaste erosivo em altas temperaturas nas usinas termoeletricas ocorre principalmente nos tubos dos trocadores de calor das caldeiras, que não poderiam apresentar falhas. Assim, pode-se destacar a importância do estudo dos mecanismos envolvidos no desgaste erosivo, propondo soluções adequadas que minimizem ou eliminem a necessidade de paradas para reparos desses tubos.

Para compreender os mecanismos de erosão, deve-se entender como pequenas partículas sólidas duras podem remover material da superfície de uma amostra durante o impacto. Para isso, é preciso conhecer a natureza e/ou a magnitude das forças agindo entre a partícula e a amostra. Estas forças transferem energia da partícula ao material alvo e determinam a extensão e a morfologia da deformação resultante do impacto. Seja qual for o mecanismo de desgaste da amostra, as forças geradas durante o impacto entre a partícula e a amostra são responsáveis por sua

remoção. No desgaste erosivo de uma superfície dúctil, pode ocorrer uma deformação elástica, recuperável, ou uma deformação plástica, permanente, dependendo se o limite de escoamento do material é excedido em qualquer ponto durante o impacto. No desgaste erosivo de materiais frágeis, diferentes modos de formação de trincas contribuem para a perda de material pela erosão [1]. E, quando partículas duras se chocam em uma amostra de material frágil em ângulos próximos a normal, há o crescimento de trincas radiais em torno dos danos causados na superfície frágil [2].

Muitos são os fatores responsáveis pelo processo de erosão, como: i) fluxo e condições ambientais: ângulo de ataque, velocidade da partícula, rotação da partícula, temperatura, número de partículas por unidade de área em unidade de tempo, ambiente corrosivo; ii) propriedades das partículas de ataque: tamanho, forma, densidade, dureza; iii) propriedades da superfície: forma, nível de tensões, dureza, que podem ser englobadas junto com outras propriedades no comportamento mecânico do material. Uma das variáveis de grande significância é o ângulo em que a partícula atinge a superfície. Para metais dúcteis e sólidos frágeis, diferentes curvas para erosão são obtidas em função deste ângulo de ataque [3].

Este trabalho apresenta o estudo de revestimentos protetores para fazer frente à solicitação de desgaste. Com isso, pretende-se definir alternativas de otimização de partes de equipamentos, sujeitas a solicitações de desgaste erosivo a quente, que podem promover o aumento de vida útil desses equipamentos em serviço. Técnicas como HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), plasma spray e oxi-gás possibilitam o recobrimento de partes/componentes de estruturas e máquinas com materiais mais resistentes a ataques por corrosão e/ou desgaste (erosivo). No entanto, antes da adoção de uma das alternativas possíveis em termos de revestimentos protetores contra o desgaste, é necessário fazer uma avaliação em escala de laboratório para que o comportamento do revestimento quando solicitado nas condições reais de serviço seja previsível.

II. PARTE EXPERIMENTAL

Os ensaios de erosão foram realizados em laboratório visando reproduzir as condições que ocorrem na prática

nos tubos de trocadores de calor de uma usina termoeletrica. Para simular essas condições, desenvolveu-se um aparato experimental, como é mostrado no diagrama esquemático da Figura 1. O dispositivo foi desenvolvido baseado na norma ASTM G-67. O tubo acelerador é a principal parte do dispositivo, onde as partículas erosivas são aceleradas e se distribuem ao longo da seção. Antes do fluxo de ar chegar ao tubo acelerador passa por um estrangulamento do tipo "de Laval" visando eliminar variações na velocidade das partículas erosivas devido a flutuações na pressão da linha de ar comprimido.

Os parâmetros mantidos constantes durante os experimentos foram: fluxo de partículas de cinzas de 6,5 g/min; velocidade do fluxo de cinzas de 30 m/s; temperatura média no corpo-de-prova de 310°C; tempo de ensaio de 10 h; material de ataque cinzas provenientes da queima do carvão mineral; e ângulo de ataque de 90°. Este ângulo de ataque foi definido a partir da constatação na análise post-mortem destes tubos, onde a superfície mais erodida era exatamente a superfície que forma ângulos próximos à normal em relação ao movimento das cinzas na caldeira (Figura 2).

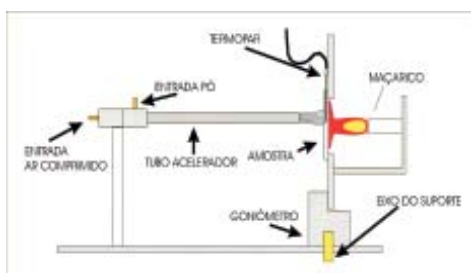


FIGURA 1 - Aparato experimental desenvolvido para efetuar os testes de desgaste.



FIGURA 2 - Tubos de trocador de calor de uma usina termoeletrica. O aspecto brilhante da superfície superior sugere a maior erosão em ângulos de ataque próximos a 90°.

A Tabela 1 apresenta a caracterização das cinzas de carvão mineral utilizada como material erosivo neste trabalho.

TABELA 1

Caracterização da cinza leve.

Análise granulométrica(a)	D10: 3,4µm; D50: 27,2µm; D90: 48,7µm
Composição química(b)	óxidos predominantes: 69% SiO ₂ , 19% Al ₂ O ₃ e 7% Fe ₂ O ₃
Composição mineralógica(c)	quartzo, mulita e silimanita
Morfologia(d)	forma arredondada e com aglomerados (Figura 3)

Técnicas: (a) difração a laser, (b) fluorescência de raios X, (c) difração de raios X e (d) microscopia eletrônica de varredura.

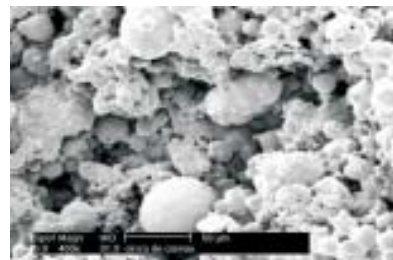


FIGURA 3: Morfologia das cinzas: partículas e aglomerados mais arredondados do que angulares.

Os corpos-de-prova utilizados no aparato experimental de desgaste apresentavam seção cilíndrica, diâmetro de 25 mm e espessura de 5 mm. O padrão utilizado foi o aço SAE 1020. Os revestimentos, WC-12Co, Cr₂C₃-NiCr e WC-CrC-Ni, foram aplicados sobre o substrato pela técnica de HVOF, com uma camada de aproximadamente 0,3mm. Esta técnica foi escolhida em função do melhor resultado (baixa porosidade) apresentado em metais. A Tabela 2 apresenta a composição química destes revestimentos e os parâmetros empregados em sua aspersão. Após a aspersão, a superfície das amostras foi preparada para o desgaste através de um lixamento e polimento, para que os resultados de desgaste fossem avaliados comparativamente com o aço a partir das mesmas condições da superfície exposta ao ataque das cinzas de carvão mineral.

TABELA 2

Parâmetros de aspersão de acordo com o material do revestimento.

Parâmetros	WC-12Co	Cr ₂ C ₃ -NiCr	WC-CrC-Ni
Composição química	88%WC 12%Co	75%Cr ₂ C ₃ 20% Ni 5%Cr	73% WC 20% Cr 7%Ni
Fluxo de Oxigênio (l/min)	873	944	873
Vazão de Querosene (l/min)	0,35	0,38	0,35
Distância de aspersão (mm)	350	350	350
Taxa de alimentação (rpm)	3,0	2,5	3,0

O desgaste das amostras foi avaliado através da perda de espessura na região desgastada em relação à região não desgastada. Para quantificar a perda de material dos revestimentos estudados, utilizou-se um relógio comparador milesimal Mitutoyo, com um erro aproximado de 0,001mm. Os corpos-de-prova foram colocados em uma superfície plana e com o relógio comparador quantizou-se a perda de material. Desta forma, pode-se comparar a performance dos revestimentos utilizados, bem como o padrão (aço SAE 1020), em função da avaliação da profundidade do desgaste.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as amostras após o desgaste erosivo a quente a 90° e, para comparação, antes deste. Através da análise visual observa-se que as amostras revestidas apresentaram um menor desgaste em relação à amostra padrão de aço SAE 1020 (Figura 4a), para as mesmas condições de ensaio. A perda de espessura devido ao

desgaste erosivo das amostras é apresentada na Tabela 3, obtida com o auxílio do relógio comparador.

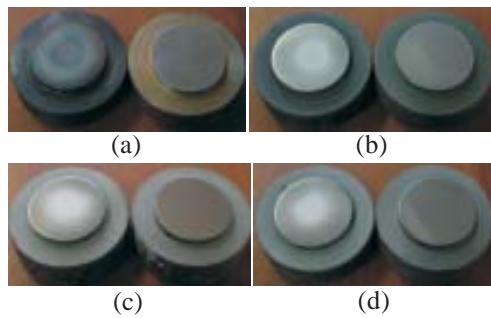


FIGURA 4: Amostras após o desgaste erosivo a quente e antes do mesmo (a) aço SAE 1020, (b) WC-12Co, (c) Cr_2C_3 -NiCr e (d) WC-CrC-Ni.

TABELA 3
Perda de espessura das amostras devido ao desgaste erosivo

Material	Perda de espessura (μm)
Aço SAE 1020	27
Cr_2C_3 -NiCr	3,0
WC-CrC-Ni	2,0
WC-12Co	1,5

Através dos resultados apresentados na Tabela 3, observar-se que os revestimentos aplicados por aspersão apresentam resistência ao desgaste erosivo superior a do aço. Entre os revestimentos, o WC-12Co apresenta a maior resistência ao desgaste, e esta é aproximadamente dezoito 18 vezes mais resistente que o padrão, seguido do WC-CrC-Ni 13 vezes, e o Cr_2C_3 -NiCr 9 vezes.

Segundo a Literatura, a ordem de grandeza do desgaste erosivo é função também de algumas características do abrasivo empregado. Desta forma, partículas graúdas, com constituintes mineralógicos de alta dureza e formas angulares, promovem um elevado desgaste erosivo [4]. Com base nas características das cinzas utilizadas neste trabalho (tamanho de partículas médio de 27 μm , fases constituintes quartzo, mulita e silimanita e forma mais arredondada do que angular), era de se esperar um baixo desgaste erosivo, tendo em vista principalmente sua morfologia e composição mineralogia, comparando com trabalho já publicado [4].

O mecanismo de desgaste responsável pela perda de material pode ser avaliado analisando-se a microestrutura do material alvo. A Figura 5 apresenta a microestrutura, da seção transversal, do aço, bem como dos três revestimentos testados, antes e após o desgaste erosivo a quente. O desgaste erosivo, remoção de material de uma superfície pelo impacto de partículas abrasivas, causa um dano no material que depende principalmente da tensão de escoamento deste. Uma maneira de estimar a extensão do dano causado é calcular o número de Best (Equação 1) [5]. Na Equação 1, ρ é a densidade do material alvo, V é a velocidade das partículas e Y é o limite de escoamento do material

alvo. A Tabela 4 mostra o tipo de deformação esperada pelo impacto de partículas abrasivas para uma larga faixa do número (adimensional) de Best.

$$B = \rho \frac{V^2}{Y} \quad (1)$$

O número de Best, considerando-se os dados dos materiais utilizados e a velocidade imposta às partículas no ensaio de desgaste, é apresentado na Tabela 5. Para o aço SAE 1020, obtém-se o valor de $2,8 \times 10^{-2}$. Comparando-se este valor com os valores da Tabela 4, observa-se que o tipo de dano esperado para o material alvo é a deformação plástica.

TABELA 4
Variação do tipo de dano com o número de Best [5].

Número de Best	Regime do dano
10-5	elástico, quase estático
10-3	início da deformação plástica
101	deformação plástica extensiva
103	fenômeno da hiper-velocidade
Antes do desgaste	Após o desgaste

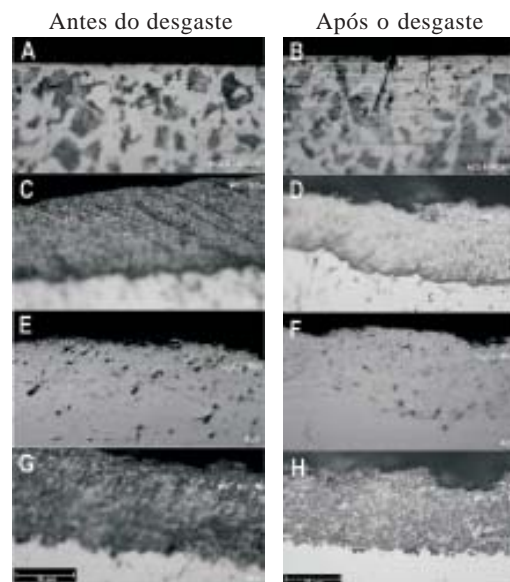


FIGURA 5: Microestruturas da seção transversal antes e após o desgaste das amostras (a,b) aço SAE 1020, (c,d) CW-12Co, (e,f) Cr_2C_3 -NiCr; (g,h) WC-CrC-Ni. (Microscopia ótica, aumento 500x).

TABELA 5
Número de Best dos diferentes materiais submetidos ao desgaste neste trabalho.

Revestimento / Material	Número de Best Calculado
Aço SAE 1020	$2,8 \times 10^{-2}$
Cr_2C_3 -NiCr	$1,6 \times 10^{-2}$
WC-CrC-Ni	$2,9 \times 10^{-2}$
WC-12Co	$1,8 \times 10^{-2}$

Assim, avaliando-se os resultados da perda de espessura dos materiais testados (Tabela 3), e a microestrutura da seção transversal das regiões desgastada e não

desgastada (Figura 5), pode-se estimar os mecanismos responsáveis pelo desgaste erosivo. No aço, este mecanismo pode ser explicado pelo balanço energético para materiais dúcteis (Figura 6): na colisão de uma partícula erosiva esférica em ângulos próximos a normal, entre 1 a 10% da energia cinética inicial é restituída à partícula por forças elásticas, sem contribuir para a erosão, e cerca de 90% de energia é gasta no trabalho plástico; desta, até 10% é armazenada no metal em discordâncias e outras imperfeições cristalinas e, aproximadamente 80% é degradada em calor [6]. Portanto, para o aço estudado, pode-se observar que a energia cinética foi suficientemente alta e/ou o material apresentou baixa resistência ao escoamento, para deformar plasticamente. Isso para as primeiras partículas que atingem a superfície. Para as subseqüentes, a superfície já estará menos dúctil, em um processo crescente de encruamento e fragilização, até o arrancamento de parte da superfície. A nova superfície sofre o mesmo processo de encruamento, desprende-se, e assim ciclicamente. A análise da vista superior das microestruturas do aço (Figura 7 a e b) sugere que após o desgaste a superfície tornou-se mais irregular. Isto foi confirmado pelo aumento da rugosidade superficial, cujos dados são apresentados na Tabela 7.

Já nos revestimentos, o mecanismo de erosão não está bem definido, pois as características microestruturais como porosidade, tamanho de grão, aderência ao substrato e ausência de trincas, influenciam o desempenho quando solicitados por desgaste [7,8]. Analisando-se a microestrutura dos revestimentos (Figura 5), pode-se fazer algumas considerações. A primeira diz respeito à porosidade e presença de trincas, características de um revestimento aspergido termicamente. A porosidade atua no sentido de reduzir a resistência mecânica, e também o módulo de elasticidade. Quando o módulo de elasticidade é menor, pode-se esperar que maior parte da energia das partículas incidentes à superfície seja consumida na deformação elástica do material, para após entrar no regime plástico. Porém, a menor resistência mecânica diminui a quantidade de energia necessária ao encruamento e arrancamento de partes da superfície. Uma segunda consideração recorreria à comparação mais ampla de propriedades dos diferentes revestimentos. A Tabela 6 apresenta essa comparação. Por essa tabela, pode-se verificar a perda da espessura aumentando para os revestimentos à medida que a porosidade diminui.

TABELA 6
Comparação de propriedades do aço, bem como dos revestimentos

Material	σ_r (MPa)	E (GPa)	Porosidade	Perda de espessura (μm)
Aço SAE 1020	300	211	sem	27
$\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$	400	200	maior	3,0
WC-Cr-Ni	400	180	média	2,0
WC-12Co	760	200	menor	1,5

Por outro lado, através da microestrutura típica observada nos revestimentos, pequenas crateras e estrias (Figura 5 d, f, g), pode-se inferir que houve provavelmente um arrancamento de partículas pelo mecanismo de materiais frágeis, e só não foi acentuado, pois a cinza utilizada não é altamente erosiva. E, analisando-se a topografia do WC-12Co após a erosão (Figura 7c), verifica-se uma morfologia superficial pequena e fina, se comparada com morfologias típicas de desgaste erosivo mais acentuado [4]. A baixa rugosidade superficial dos revestimentos, avaliada após desgaste, acentua o caráter de microarrancamento de partículas da superfície (Tabela 7).

Assim, ambas as considerações e verificações sugerem uma resistência ao desgaste dependendo muito fortemente do comportamento elástico e plástico dos materiais, conjugados com a resistência mecânica dos mesmos. Esta é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas que varia conforme sua microestrutura e pela presença de defeitos, como poros e trincas, típicos de revestimentos aspergidos termicamente, o que, entretanto, varia de revestimento para revestimento.

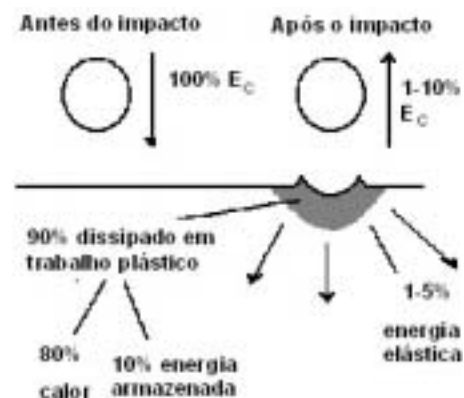


FIGURA 6: Balanço da energia no impacto normal de partículas erosivas.

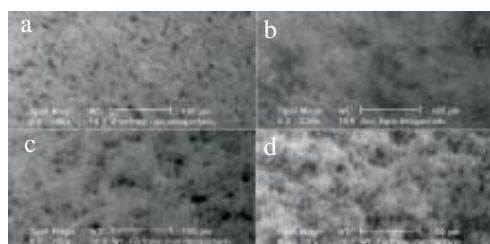


FIGURA 7: Microestruturas da vista superior antes e após o desgaste, respectivamente, das amostras (a, b) aço SAE 1020 e (c, d) WC-12Co.

Por outro lado, para averiguar se as amostras sofreram mudanças microestruturais em função da temperatura do ensaio (310°C), bem como do tempo de exposição (10 horas), avaliou-se a dureza destas antes e após o desgaste (na região exterior a este), os valores são apresentados na Tabela 8. Na análise dos resultados, observa-se que não houve mudança significativa da dureza do aço, bem como das amostras revestidas. Logo pode-se inferir que esta temperatura e/ou tempo não foram suficientes para reorganizar a estrutura, nem mesmo para aliviar as tensões anteriores ou mesmo geradas durante o ensaio.

TABELA 7

Rugosidade (R_a) antes e após o desgaste erosivo.

Revestimento/Material	Rugosidade R_a (μm)	
	Antes do desgaste	Após o desgaste
AçoSAE 1020	0,08	0,47
WC-Cr-Ni	0,29	1,00
Cr_2C_3 -NiCr	0,10	1,14
WC-12Co	0,15	0,54

TABELA 8

Dureza (R_B) antes e após o desgaste erosivo.

Revestimento/ Material	Dureza (R_B)	
	Antes do desgaste	Após o desgaste
AçoSAE 1020	88	90
WC-Cr-Ni	97	99
Cr_2C_3 -NiCr	94	96
WC-12Co	97	100

IV. CONCLUSÕES

A partir os resultados obtidos pode-se inferir as seguintes conclusões:

- i) Os revestimentos testados WC-12Co, Cr_2C_3 -NiCr, WC-CrC-Ni apresentam resistência ao desgaste erosivo a quente superior ao aço;
- ii) O revestimento que apresentou melhor desempenho frente às condições testadas foi o WC-12Co;
- iii) A cinza utilizada apresentou baixa erosividade comparada com dados da Literatura;
- iv) O desgaste erosivo a quente para o aço é consequência da deformação plástica, subsequente fragilização da estrutura e posterior desprendimento do material;
- v) O desgaste erosivo dos revestimentos depende de suas propriedades físicas e mecânicas, bem como da microestrutura;
- vi) A temperatura e ou tempo não modificou a microestrutura do aço, bem como das amostras revestidas.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUTCHINGS, I. M. - "The erosion of ductile metals by solid particles" PhD. Dissertation, Univ. of Cambridge (1974). p. 45-52.
- [2] FINNIE, I.; LEVI, A. V e Mcfadden, D. H. - "The fundamental mechanisms of the erosive wear of ductile metals by solid particles" in ASTM STP 664 "Erosion: prevention and usefull applications" (1979).
- [3] SUCKLING, M. e ALLEN, C. - "Critical variables in high temperature erosive wear", Wear 203-204 (1997), p. 528-536.
- [4] WANG, B. Q. e VERSTAK, A. - "Elevated temperature erosion of HVOF Cr3C2/TiC-NiCrMo cermet coating", Wear 233-235 (1999), p. 342-351.
- [5] HUTCHINGS, I. M. - "Mechanisms of the erosion of metals by solid particles - Erosion: prevention an useful applications" ASTM STP 664 (1979a).
- [6] LEVI, A. V. e CHIK, P. - "The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel", Wear 89 (2) (1986), p. 151-162.
- [7] RAASK, E. - "Erosion wear in coal utilization", Hemisphere, Springer Verlag, New York, 1988.
- [8] LEVY, A. V. e WANG, B. Q. - "Erosion of hard material coating systems", Wear, 121 (1988), p. 325-346.