

ANÁLISE DE FALHA DE PLACA DE DESGASTE DA PALHETA DE UM VENTILADOR EMPREGADO NO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ¹

Marcelo Tadeu Milan ²

Omar Maluf ³

José Ricardo Tarpani ⁴

Jair Valfre ⁵

Wanner Vieira ⁶

Resumo

A placa de sacrifício da palheta de ventilador utilizado no processo de fabricação de pelotas de minério de ferro apresentou desgaste excessivo. Determinou-se a predominância do mecanismo de desgaste por erosão, que operou também intensamente na cabeça dos parafusos de fixação da placa. Devido a presença de enxôfre na atmosfera, concluiu-se pela ação sinérgica dos mecanismos de erosão e de oxidação/sulfuração, num ciclo contínuo de degradação química da superfície metálica e arrancamento mecânico do óxido protetor, expondo a superfície fresca a novo ataque corrosivo. Recomendou-se a compatibilização da resistência ao desgaste entre parafusos e placa de modo a preservar o perfil aerodinâmico do sistema e minimizar o processo erosivo. Sugeriu-se também a adoção de um aço mais duro e resistente à corrosão e/ou a deposição de um recobrimento adequado.

Palavras-chave: Aço de construção mecânica; Análise de falha; Palheta de rotor; Corrosão; Desgaste por erosão.

FAILURE ANALYSIS OF A ROTOR WEAR PLATE EMPLOYED IN AN IRON ORE PELLETIZING PROCESS

Abstract

A sacrifice plate assembled on a rotor blade employed in the iron ore pelletizing production presented excessive wear. The main failure mechanism, operating in both the plate and locking bolts, was erosive wear. Due to the presence of sulfur in the atmosphere, it was concluded that abrasive erosion and oxidation/sulfidation mechanisms acted synergistically, where surface chemical degradation alongside mechanical removal of the protective oxide layer by impinged particles continuously expose fresh surface to new attacks. It was recommended matching the wear resistance of the bolts and plate surface in order to reduce air turbulence and minimize erosion. It was also suggested the adoption of a harder and more corrosion resistant steel and/or the use of a proper coating system.

Keywords: Corrosion; Erosive wear; Failure analysis; Rotor blade; Structural steel.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² PhD em Engenharia, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil, milan@mib.eng.br

³ Doutor em Engenharia, Diretor Executivo MIB - Materials Institute of Brazil

⁴ Professor do Depto de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil

⁵ Engenheiro Mecânico do Depto de Engenharia de Materiais da CVRD em Vitória-ES

⁶ Tecnólogo Mecânico do Depto de Engenharia de Manutenção Mecânica da CVRD em Vitória-ES

1 INTRODUÇÃO

Um esquemático de parte de um forno de pelletização de minério de ferro é ilustrado na Figura 1. Basicamente, uma correia sem fim, composta por vários carros, conduz pelotas através do forno. No fundo de cada carro há um arranjo de barras de grelha confeccionadas com aço inoxidável que suportam as pelotas e ao mesmo tempo permitem que gases circulem no leito de pelotas. Enquanto as cargas de pelotas atravessam o forno elas são sujeitas a um ciclo completo composto pelas etapas de secagem, aquecimento, queima e resfriamento, quando temperaturas tão altas quanto 1200°C podem ser alcançadas em determinadas partes do sistema. A função básica dos ventiladores, que podem também atuar como exaustores, é a de prover o ar utilizado nas diversas etapas de aquecimento e resfriamento ao longo do processo de obtenção das pelotas queimadas de minério. A temperatura máxima atingida nestes equipamentos e da ordem de 395°C, com desarme de proteção a 440°C. A rotação é variável, chegando até 900 RPM. Eles estão distribuídos ao longo de toda a planta de pelletização.

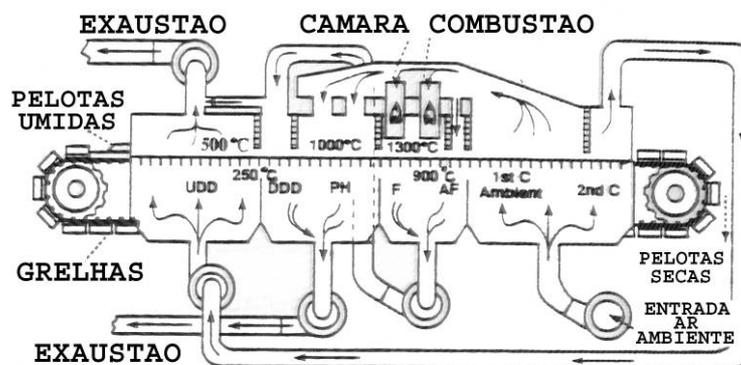


Figura 1 – Esquemática simplificada de um forno de pelletização.

No presente trabalho, objetiva-se determinar os mecanismos de falha da placa de desgaste, ou sacrifício de uma palheta do ventilador industrial.

As placas de sacrifício são parafusadas sobre as palhetas do ventilador para protegê-las contra o desgaste (Figura 2). O componente opera tipicamente a 200°C sob 900 RPM.

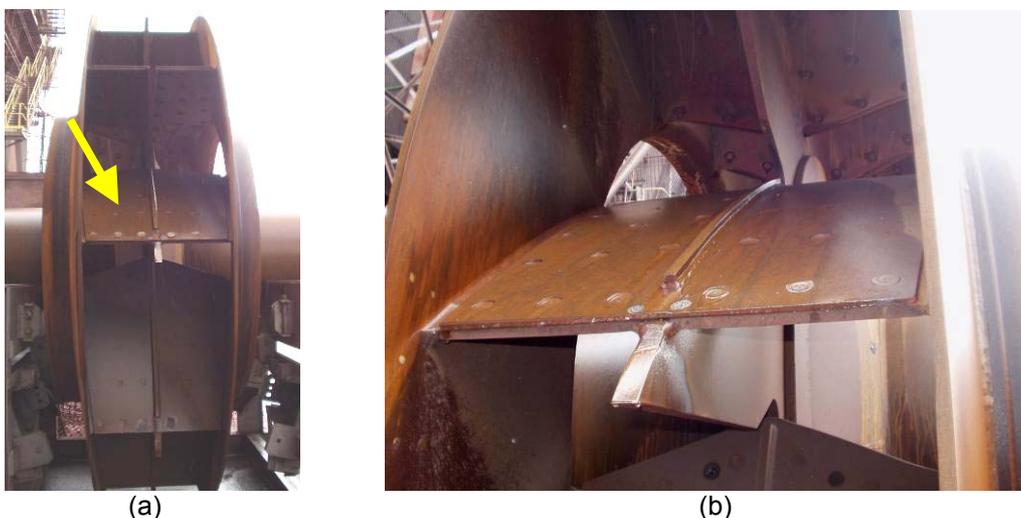


Figura 2 - (a) Ventilador industrial para secagem de minério; (b) Detalhe de uma aleta recoberta com placa de sacrifício.

As placas de desgaste são confeccionadas em aço com dureza mínima especificada de 360 HB.

As bordas de ataque e de fuga das aletas, assim como as regiões em volta da cabeça dos prendedores escareados, são as partes que sofrem maior desgaste.

2 EXPERIMENTAL

Foram realizados os seguintes procedimentos:

- Análise química (espectrometria de emissão óptica e microsonda EDX);
- Análise visual;
- Análise por microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV);
- Micro- e macro-durezas Vickers e Brinell, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

Os resultados da Tabela 1 confirmaram que o material obedece a composição do aço USI AR 360.

Tabela 1 - Análise química por espectrométrica de emissão óptica.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Ti	B
Amostra	0,17	0,19	1,34	0,02	0,01	0,31	0,01	-	0,01	-
USI AR 360	0,22 <i>máx.</i>	0,40 <i>máx.</i>	1,50 <i>máx.</i>	0,03 <i>máx.</i>	0,02 <i>máx.</i>	0,80 <i>máx.</i>	0,40 <i>máx.</i>	0,05 <i>máx.</i>	0,05 <i>máx.</i>	0,01 <i>máx.</i>

3.2 Dureza

Medidas de dureza Brinell com carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm foram realizadas em amostra metalografica segundo o plano LT da placa de sacrifício, no qual ocorre o desgaste, e os resultados estão na Tabela 2.

O valor médio obtido encontra-se acima do valor mínimo especificado para o aço USI AR 360. Os baixos valores obtidos próximo ao furo de fixação decorrem provavelmente do aquecimento excessivo experimentado pela região durante a remoção do parafuso por maçarico.

Tabela 2 - Dureza Brinell efetuada no plano LT da placa de sacrifício.

Dureza HB							Média
451	438	404	365 <i>(próximo ao furo)</i>	345 <i>(próximo ao furo)</i>	426	373	400

Medidas de microdureza Vickers, com carga de 100 g, foram realizadas em amostras da placa de desgaste segundo os três planos metalograficos principais. A Tabela 3 indica que os planos TS e LS apresentam maior dureza que o LT, conseqüência provável do processo de laminação.

Tabela 3: Microdureza Vickers efetuada nos três planos principais da placa de sacrifício do ventilador.

Dureza HV							
	1	2	3	4	5	6	Média
Plano LT	429	394	345	345	394	417	387
Plano TS	468	454	454	459	459	460	459
Plano LS	454	454	468	468	437	437	457

Merece ser ressaltado que os valores de dureza obtidos são equivalentes ao da hematita, a partícula menos dura dentre as que constituem o minério de ferro.

3.3 Análise Visual

A dureza máxima especificada para o parafuso de fixação é de 321 HB ou 35 HRC. De acordo com a Tabela 2, este valor está abaixo daquela exibida pela placa em qualquer das direções analisadas. Portanto, o parafuso apresenta provavelmente uma menor resistência ao desgaste que esta última. De fato, a Figura 3 mostra que as cabeças dos parafusos apresentam maior desgaste do que o material ao seu redor, uma vez estas deveriam estar no mesmo nível que a placa.



Figura 3 - Detalhe de cabeças de parafusos erodidas (setas amarelas).

Infelizmente, os parafusos de fixação foram removidos com maçarico, prejudicando em grande parte a análise das posições de furação da placa de sacrifício.

Entretanto foi possível verificar o desgaste preferencial do componente ao redor da cabeça dos prendedores (Figura 4). O processo de desgaste por erosão é particularmente sensível, dentre outros fatores, ao ângulo de incidência das partículas de abrasivo sobre a superfície e à velocidade das partículas. Por exemplo, materiais intrinsecamente dúcteis, como os aços, apresentam, em geral, uma taxa de desgaste máxima para um ângulo de ataque entre 20° e 30°. [1-3] Acredita-se que a descontinuidade geométrica provocada pela presença dos parafusos, e seu desgaste mais acentuado devido sua menor dureza, criam turbulências no fluxo de ar, favorecendo o processo erosivo altamente localizado. Em outras palavras, a presença do parafuso provoca alterações no ângulo de incidência com que as partículas atingem a superfície, acelerando o processo erosivo.



Figura 4 - Detalhe do desgaste preferencial na superfície da placa em torno das cabeças de parafusos e em direção à borda da placa.

Sabe-se que a taxa de erosão de um componente tem correlação direta com a velocidade de impacto das partículas abrasivas, em especial quando a dureza destas supera à do material base, tal como no caso em questão. A região em que a concentração e a velocidade tangencial do fluxo de ar atingem um pico de máximo é exatamente no centro da borda de fuga da placa. De fato, é nesta posição em que se verificaram as mais acentuadas taxas erosão, conforme pode ser observado na Figura 5.

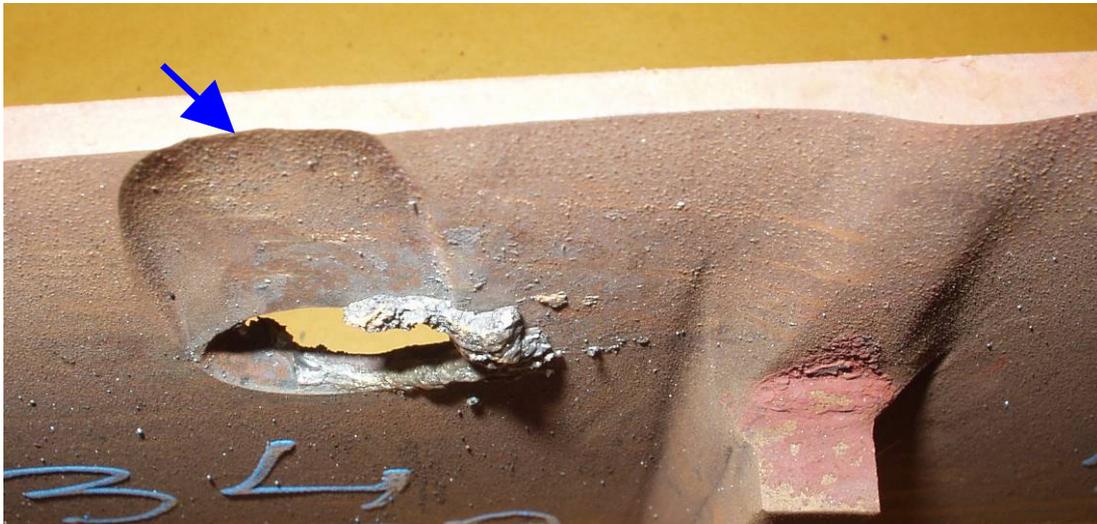


Figura 5 - Local de máxima taxa de erosão no bordo de fuga da placa de sacrifício.

3.4 Microscopias Óptica e Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise metalográfica da placa (Figura 6) indicou a presença de uma microestrutura de grãos finos, com predominância de ferrita pró-eutetóide ao redor de grãos de bainita. Geralmente, este tipo de microestrutura se caracteriza principalmente pela alta dureza aliada à alta tenacidade.

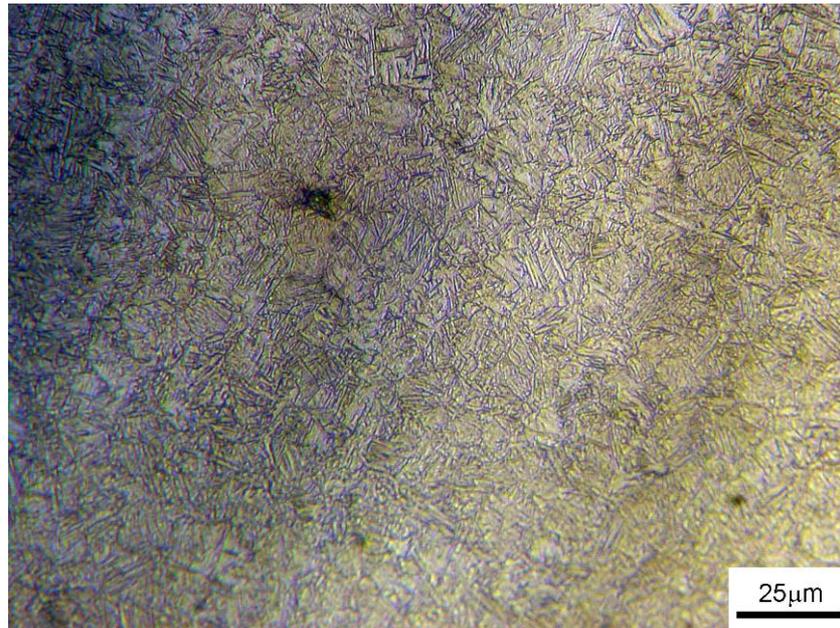


Figura 6 - Micrografia óptica da placa no plano LT. Verifica-se a textura de laminação (ao longo do comprimento da pagina).

A análise por MEV da superfície de desgaste da placa de desgaste do ventilador foi prejudicada pelo estado extremamente oxidado da superfície. A Figura 7 mostra a superfície da placa numa região da lateral da placa, que não apresentava desgaste. Uma camada de óxidos recobre toda a superfície, com espessura em torno de 15 μm , conforme mostrado na Figura 8. Análises por microsonda EDX da camada indicaram a presença de óxidos de ferro, com uma pequena porcentagem de enxofre, conforme listado na Tabela 4.

Para aços-carbono de baixa liga, o fenômeno de oxidação é mais severo para temperaturas acima de 570°C , onde a camada de óxidos é formada predominantemente pela *wustita*, FeO . Apesar desta fase apresentar alta plasticidade, a adesão da camada de óxidos ao substrato é baixa devido às rápidas taxas de reação, favorecendo uma perda acentuada de material. Abaixo de 570°C , a camada formada consiste de uma camada interna de magnetita, Fe_3O_4 , e outra, externa de hematita, Fe_2O_3 , sendo compacta e de taxa de reação lenta.^[4,5] Portanto, como o ventilador opera sempre abaixo de 400°C , a camada de óxidos presente é formada por magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3).

O enxofre detectado por EDX é advindo provavelmente da queima de óleo e de carvão no processo de pelletização. O enxofre é muito mais agressivo do que o oxigênio, atacando o material por sulfuração. Se presente na atmosfera na forma de óxidos (SO_2 ou SO_3), pode se combinar com o vapor d'água gerando ácidos sulfuroso e sulfúrico que têm alto poder corrosivo e que podem acelerar de maneira significativa a cinética da taxa de desgaste da placa de sacrifício.

A presença de elementos de liga na placa, mesmo que em pequenas proporções, tais como Mn, Si, Cr e Ni, favorecem uma redução na taxa de oxidação/sulfuração. Em particular, a presença de Cr, favorece a formação de uma camada de óxidos rica em cromo que protege o aço de oxidações adicionais. A presença de cromita, Cr_2O_3 , além do efeito anti-oxidante, pode contribuir para reduzir a taxa de desgaste uma vez que ela apresenta uma dureza bastante elevada, da ordem de 2000 HV, quando comparada aos óxidos de ferro que possuem durezas variando entre 450 HV a 600 HV.

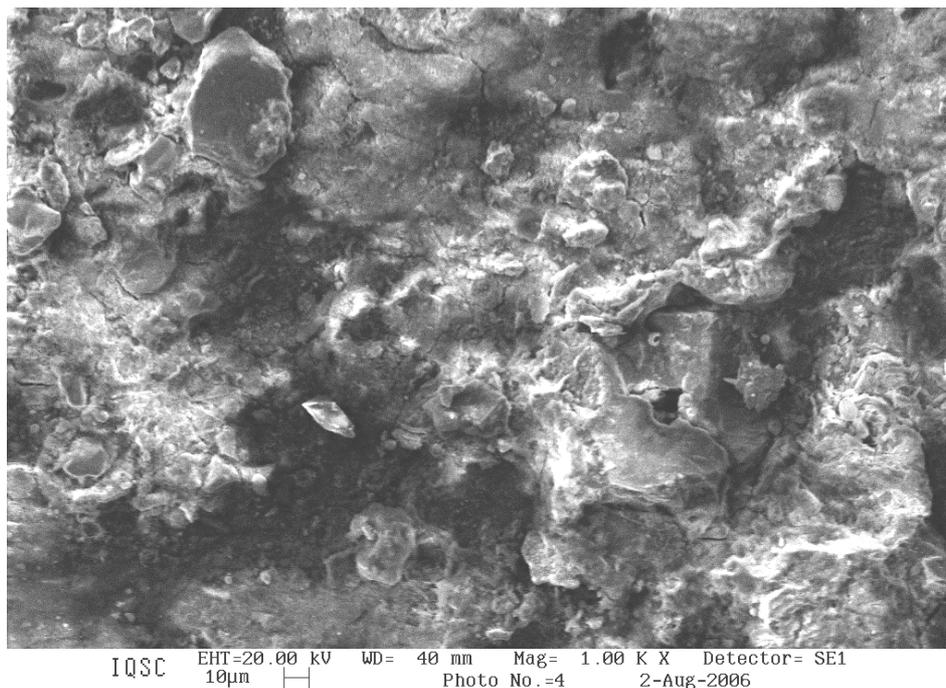


Figura 7 - Imagens por MEV da superfície da placa de desgaste, correspondente a uma região não desgastada da sua borda lateral.

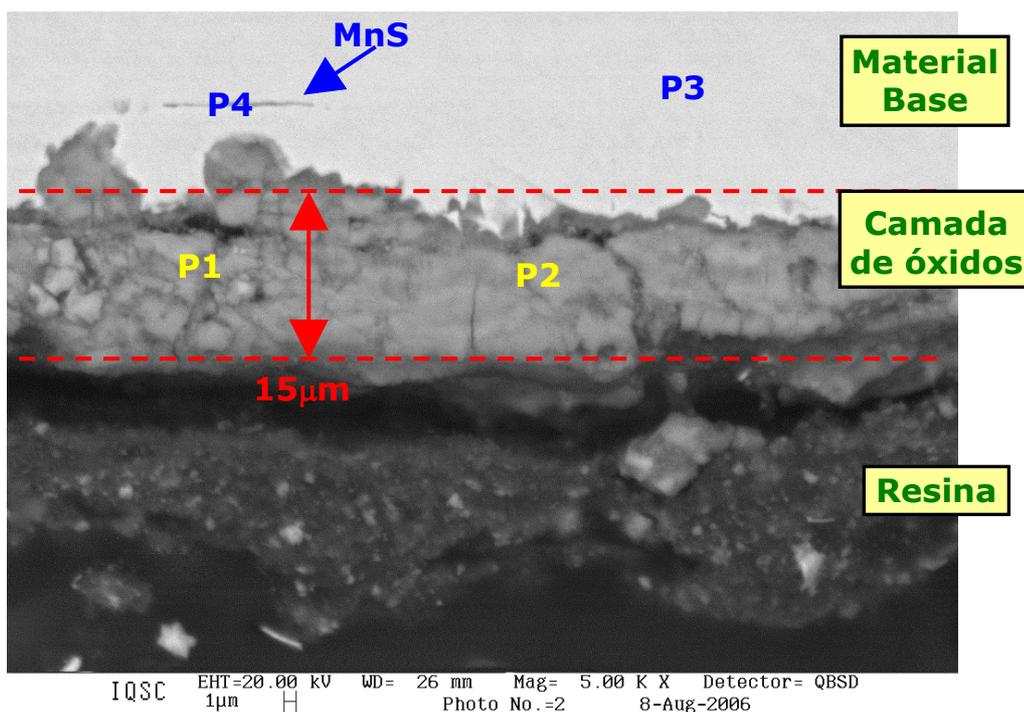


Figura 8 - Imagem por MEV mostrando a seção transversal da camada de óxidos sobre o metal base, anteriormente apresentada na Figura 7.

Tabela 4 - Análise semi-quantitativa por EDX dos pontos indicados na Figura 8. Resultados aproximados em % em peso.

	Fe	Mn	Si	Cr	Ca	O	S
Ponto 1 (Camada)	80	0,9	0,2	0,3	0,2	18	0,5
Ponto 2 (Camada)	53	0,7	0,2	0,3	-	46	0,6
Ponto 3 (Metal base)	98	1,3	0,4	0,4	-	-	-
Ponto 4 (Sulfeto)	77	14	0,3	0,4	-	2	6,2

Após a limpeza química da superfície observada na Figura 7 foi possível visualizar parte da superfície do metal, conforme a Figura 9, que apresenta cavidades, sem bordas salientes, resultantes provavelmente do processo de remoção dos óxidos quando da limpeza. A superfície exposta se revela relativamente plana e sem aspectos de deformação plástica causada por impactos de partículas.

Portanto, longe das regiões de desgaste acentuado, a placa foi submetida essencialmente à oxidação. Em outras palavras, a camada de óxidos é suficientemente resistente para “blindar” o substrato metálico do impacto das partículas. Adicionalmente, como a temperatura de operação é menor do que 570°C, o crescimento da camada de óxidos é lento e a camada encontra-se firmemente aderida à superfície, evitando perda de massa significativa.

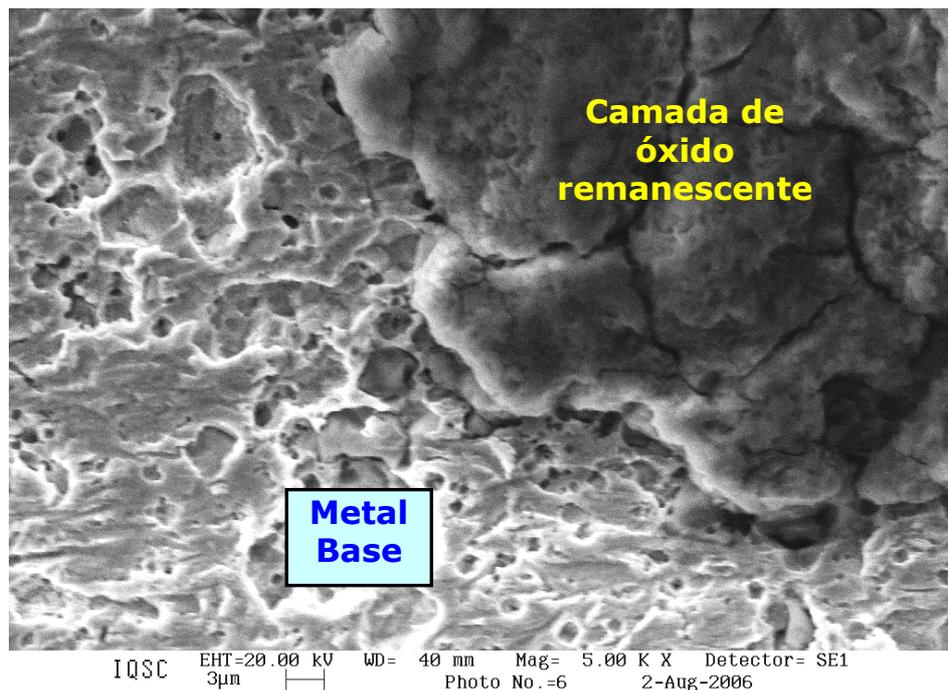


Figura 9: Imagem por MEV da superfície da placa de desgaste após limpeza química dos óxidos. Região da placa de desgaste em que o fluxo de ar sofre arraste (desaceleração) provocado pelas paredes laterais do ventilador.

Conforme mostra a Figura 10, após a limpeza química dos óxidos, a superfície da região de desgaste altamente localizado junto a um dos furos de prendedores (vide Figura 4) apresenta uma topografia notadamente irregular, apresentando crateras, com bordas salientes, produzida pelo impacto em alta velocidade das partículas em suspensão, sob ângulos mais favoráveis gerados pelas irregularidades na direção do fluxo de ar. A borda de material deslocado por deformação plástica é posteriormente fraturada pelo impacto de outra partícula, resultando assim em grandes perdas de massa associadas ao processo de desgaste.

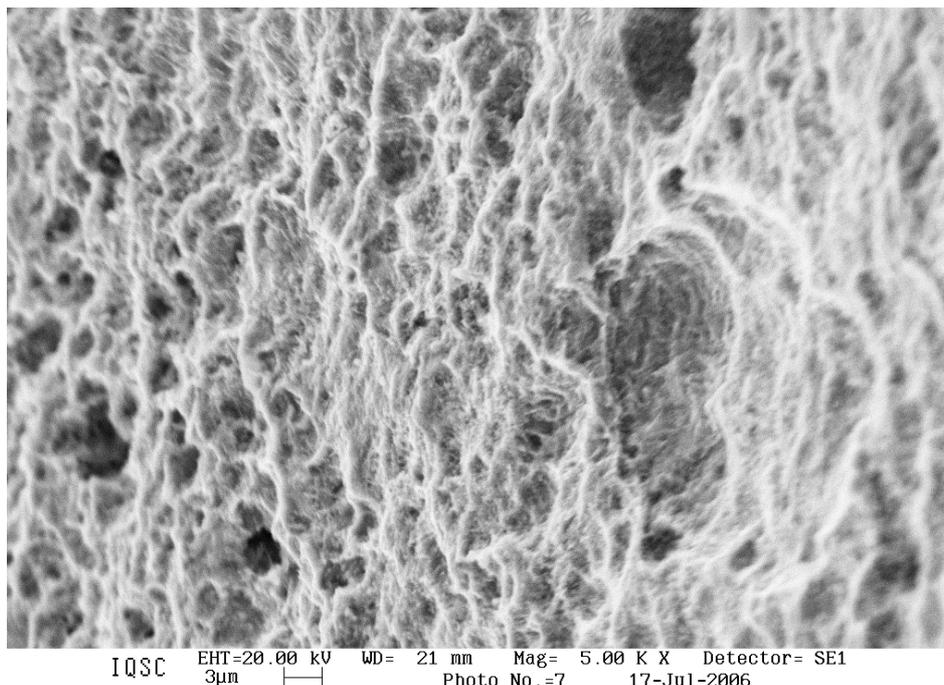


Figura 10: Análise por MEV, após limpeza química de óxidos da superfície de desgaste da placa, em região próxima a uma furação para fixação de parafuso (Figura 3).

4 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- O material recebido para análise encontra-se dentro das especificações de dureza e composição química estabelecidas para o aço USI AR 360;
- Regiões sujeitas a altas velocidades de impacto, alto fluxo de ar e ângulos de incidência favoráveis, tais como a borda de fuga e nas proximidades da cabeça do parafuso, experimentam uma sinergia entre os processos erosivo e oxidativo. As partículas em suspensão têm um efeito de “polimento” sobre a camada de óxidos, reduzindo a sua espessura e também produzindo crateras de impacto, cujas bordas salientes fraturam posteriormente pelo impacto de outra partícula, e assim sucessivamente;
- Irregularidades geométricas na placa, tais como as introduzidas pelo maior desgaste da cabeça do parafuso (em virtude de sua relativamente baixa dureza), e os chamados efeitos de borda, alteram o ângulo de incidência das partículas, provocando erosão altamente localizada nestas regiões em especial;
- Regiões da placa sujeitas a velocidades mais baixas de partículas e/ou ângulos de incidência rasos, tal como a lateral, sofrem predominantemente oxidação. A camada oxidada forma uma “blindagem” contra o desgaste, sendo relativamente estável devido às temperaturas de operação serem inferiores a 570°C;
- Foi detectada a presença de enxôfre na camada advindo dos processos de queima do forno de pelletização e que pode acelerar o processo de degradação por sulfuração, visto este elemento ser mais reativo com o metal base do que o oxigênio.

5 RECOMENDAÇÕES

- Compatibilizar a resistência ao desgaste do parafuso com a da placa de modo a não criar turbulência por desgaste localizado;
- Na medida do possível, minimizar a presença de descontinuidades geométricas na superfície da placa, com o intuito de maximizar sua eficiência aerodinâmica;
- Aumentar a dureza e a resistência à oxidação da placa pela seleção de novo material e/ou deposição de recobrimento adequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Lansdown, A.R.; Price, A.L. (1986) Materials to resist wear: a guide to their selection and use. Oxford: Pergamon Press, 128 p.
- 2 Roy, M. (2006) Elevated temperature erosive wear of metallic materials. J. Phys. D: Appl. Phys., v.39, p.R101-R124.
- 3 Tilly, G.P.; Sage, W. (1970) The interaction of particle and material behaviour in erosion processes. Wear, v.16, p.447–465.
- 4 Khanna, A.S. (2002) Introduction to high temperature oxidation and corrosion, ASM International, Chapter 6: Oxidation of pure metals, p.79-109.
- 5 Khanna, A.S. (2002) Introduction to high temperature oxidation and corrosion, ASM International, Chapter 8: Oxidation in mixed gas environments, p.135-171.