

ANÁLISE DE FALHA DE ROLOS CLASSIFICADORES DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO ¹

Marcelo Tadeu Milan ²
Omar Maluf ³
José Ricardo Tarpani ⁴
Jair Valfre ⁵
Cláudio Cesário ⁶

Resumo

Rolos classificadores de pelotas de minério de ferro apresentaram intenso desgaste superficial, associado à intensa agregação de partículas de minério. Determinou-se que a presença de ferrita e de vazios de fundição no aço, além da excessiva rugosidade superficial podem ter contribuído para o efeito de ancoramento de partículas. O mecanismo básico de dano dos rolos foi o de desgaste abrasivo livre a dois corpos, com perda de massa via sulcamento e riscamento da matriz por partículas de minério. Concluiu-se que o espaçamento entre os precipitados de carbonetos no aço é grande o suficiente para permitir tais fenômenos. Foi recomendado o uso de um aço mais duro, com uma distribuição mais refinada de carbonetos fortalecedores, e sugerida a aplicação de um revestimento de alta dureza, com os devidos cuidados quanto às propriedades magnéticas e acabamento superficial finais.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Análise de falha; Componente rotativo; Desgaste; Revestimento.

FAILURE ANALYSIS OF CLASSIFYING ROLLERS OF IRON ORE PELLETS

Abstracts

Classifying rollers of iron ore pellets presented surface wear, alongside iron ore particle agglomeration. It was determined that the presence of ferrite and casting defects in the microstructure, besides excessive surface roughness, may have contributed to the anchorage effect of the particles. The basic wear mechanism on the rollers was two body abrasion, where weight loss was mainly caused by scratching and plowing of the austenite matrix by the iron ore particles. It was concluded that the carbide interparticle spacing within the matrix was large enough to allow such phenomena to take place. Harder steel was recommended, with a finer carbide distribution, and a hard coating was also suggested, taking the necessary precautions regarding final magnetic and surface finishing properties.

Key words: Coating; Failure analysis; Rotating component; Stainless steel; Wear.

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 Engenheiro 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 suporta as pelotas e ao mesmo tempo permite 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. Os rolos classificam as pelotas de acordo com seu tamanho, transportando parte delas para o processo de queima (acima de um tamanho mínimo) e retornando a outra parcela (abaixo daquele tamanho) para serem reprocessadas. Os rolos classificadores se localizam logo no início do circuito ilustrado na Figura 1 (destaque no círculo azul), quando as pelotas ainda estão úmidas.

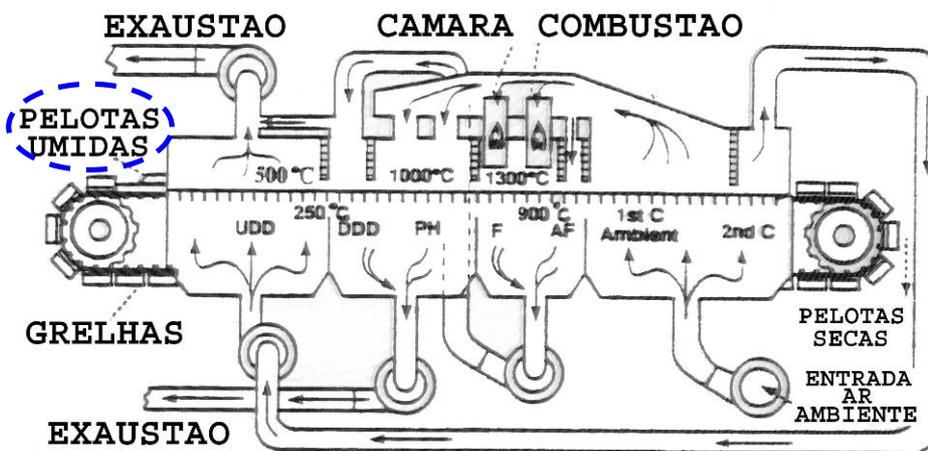


Figura 1 - Esquematização simplificada de um forno de pelletização.

No presente trabalho, objetiva-se determinar os mecanismos de falha de rolos classificadores que apresentaram problemas de desgaste e de agregação de minério, conforme mostra a Figura 2. Os rolos operam entre a temperatura ambiente e 90°C.



Figura 2 - Rolos classificadores desgastados.

2 EXPERIMENTAL

Foram realizados os seguintes procedimentos:

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

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

A análise química (Tabela 1) indicou um material fora das especificações (ASTM A297 – HH modificado) quanto aos teores de C, Ni e W. Neste tipo de material, há uma competição entre os elementos estabilizantes da ferrita (que formam carbonetos, tal como Cr, Si, Mo, Nb e V) e os estabilizadores da austenita (que formam soluções sólidas intersticiais, ou substitucionais, tais como o C, N, Mn e Ni). Destaque-se que os elementos formadores de carbonetos (ditos ferrogenicos) também são os principais responsáveis pela alta dureza e resistência ao desgaste do aço. Assim, altos teores de C e Mo, aliados a V e Si, contribuem para o aumento de dureza, enquanto que W abaixo do especificado resulta numa dureza menor que a desejada.

Tabela 1 - Análise química por espectrometria de emissão óptica.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W
Amostra	0,49	1,19	0,82	0,04	0,01	26,3	10,7	0,50	0,27
A297-HH mod.	0,25-0,45	2,00 max	2,00 max	0,04 max	0,04 max	24,0-27,0	11,0-14,0	0,30-0,50	1,0-1,5

Contrariamente ao que se imagina comumente, os aços ASTM A297 são predominantemente austeníticos, e não 100% austeníticos. A presença de certa porcentagem de ferrita (calculada com base em diagramas como o de Schoefer, derivado do famoso diagrama de Schaeffler para metais de solda) implica em certo magnetismo.^[1]

Realizados os devidos cálculos, em que os elementos estabilizadores de ferrita são convertidos em “Cromo equivalente”, e os da austenita em “Níquel equivalente”, de acordo com a norma ASTM A800M não deveria haver ferrita presente na microestrutura. De fato, uma rápida análise com um ímã, não revelou atração magnética sensível.

No entanto, considerando-se a faixa de composição química permitida pelo desenho do componente, e realizando-se novamente os cálculos de Schoefer, concluiu-se por um teor de ferrita da ordem de 10%, podendo mesmo chegar a 15%, levando-se em conta as imprecisões de análise química. Portanto, a especificação do desenho não exclui a possibilidade do material apresentar algum magnetismo.

Merece ser observado que, segundo a norma ASTM A800M, a aplicabilidade do diagrama de Schoefer limita-se a ligas com teor máximo de C de 0,20 % em peso, inferior, portanto, aos aproximadamente 0,50% exibidos pelo material em questão. Além disto, o diagrama não inclui um potencial efeito ferritizante causado pelos elementos Ti e W que são fortes formadores de carbonetos, assim como o Cr, Mo e Nb. Entretanto, o diagrama fornece uma boa aproximação da realidade, podendo ser utilizado em análises preliminares.

3.2 Análise Visual e Rugosidade Superficial

A superfície desgastada do rolo mostra a presença de ranhuras circunferenciais, vistas na Figura 3. Acredita-se que tais ranhuras são, em parte, decorrentes de marcas remanescentes do processo de usinagem do rolo.

Medidas de rugosidade foram realizadas nas regiões desgastada (seta amarela) e intacta (azul), conforme assinaladas na Figura 3, obtendo-se valores de R_a de $1,60 \mu\text{m}$ e $1,30 \mu\text{m}$, respectivamente, sendo ambas as medidas superiores ao limite especificado em projeto ($0,2 \mu\text{m} < R_a < 0,4 \mu\text{m}$). Desta forma, infere-se que o processo de desgaste abrasivo livre a dois corpos, provocado pelo rolamento da pelota sobre o rolo, tem um efeito de aumentar a rugosidade superficial.

Os rolos também sofrem problemas de agregação de minério (Figura 1), devido à fixação de partículas de minério às irregularidades da superfície desgastada e por uma possível atração magnética entre as partículas de magnetita do minério e a ferrita presente na microestrutura do aço. Ainda conforme mostra a Figura 2, outro efeito das pelotas sobre os rolos é o de provocar desgaste altamente localizado sobre a superfície. A presença de heterogeneidades microestruturais e/ou geométricas na superfície do rolo pode favorecer um desgaste preferencial em determinada localização, resultando na presença constante de pelotas rolando sobre o mesmo ponto, criando-se sulcos na superfície.

Exames realizados com líquido penetrante não revelou a presença de trincas na superfície do rolo e, portanto, desgaste abrasivo livre a dois corpos^[2] é muito provavelmente o único mecanismo de dano atuando na peça.

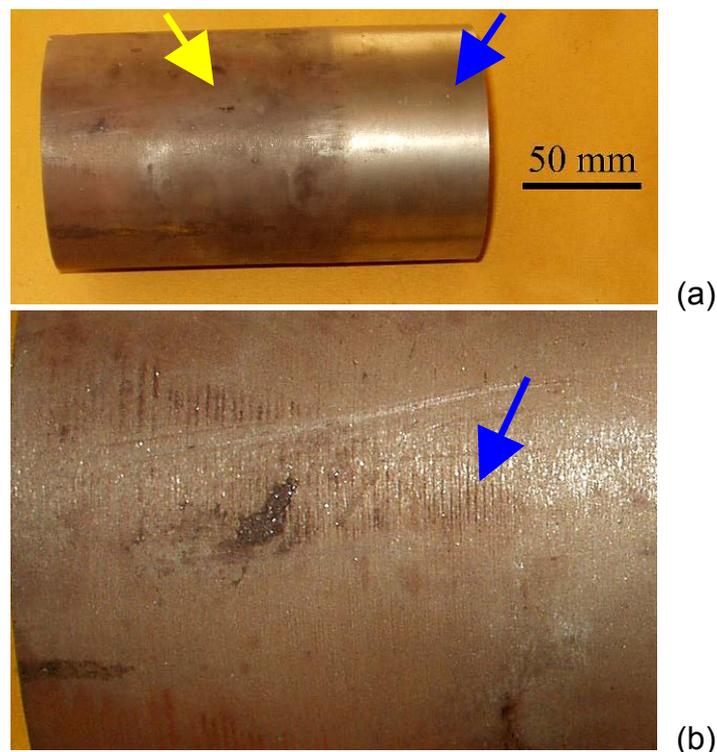


Figura 3 – (a) Parte do componente como retirado de serviço; (b) Detalhe das ranhuras circunferenciais, provavelmente remanescentes do processo de usinagem do rolo.

3.3 Dureza

Medidas de dureza Brinell com carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm foram realizadas em amostra metalográfica segundo o plano LT, no qual se desenvolve o mecanismo de desgaste do rolo, e os resultados estão na Tabela 2. Observa-se que os valores de dureza obtidos encontram-se bem abaixo do limite inferior da dureza de partículas de minério de ferro, o qual varia entre 400 HB e 600 HB.

Tabela 2: Medidas de dureza Brinell efetuadas no plano LT.

Dureza HB							Média
255	272	272	266	255	272	266	265

Medidas de microdureza Vickers com carga de 25 g foram também conduzidas em amostras metalográficas extraídas do rolo classificador. Conforme lista a Tabela 3, o valor médio de microdureza da matriz austenítica é cerca de 15% menor do que a macrodureza média obtida para a liga, enquanto que os valores medidos junto aos carbonetos são cerca de 40% maiores que aquela.

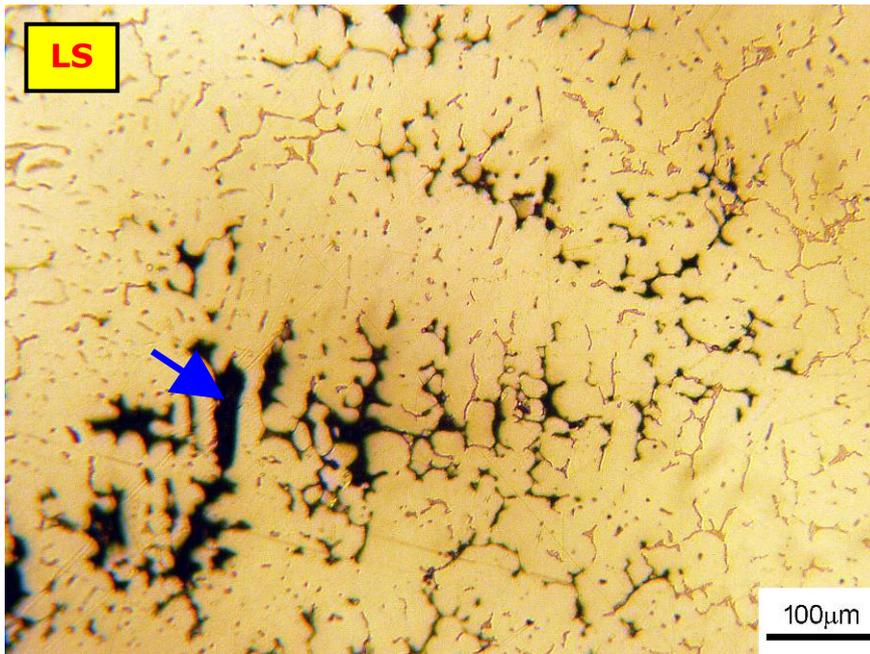
Tabela 3: Medidas de microdureza Vickers. Os valores convertidos para a escala Brinell são também apresentados.

	HV25					Média	HB
	1	2	3	4	5		Média
Matriz austenítica	234	233	239	247	248	240	228
Próximo a carbonetos	370	383	429	-	-	397	379

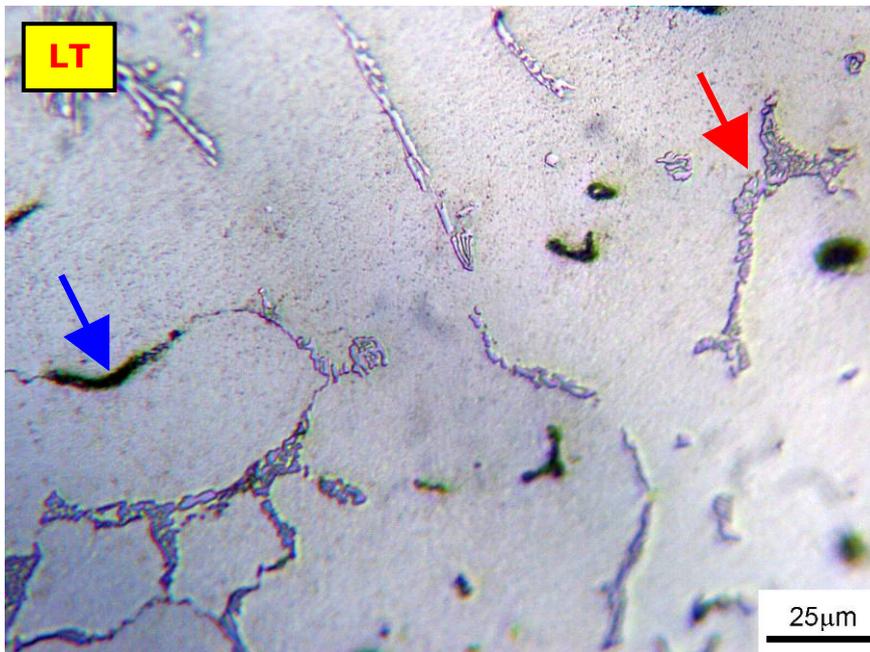
3.4 Microscopia Óptica

A análise metalográfica do componente revelou (Figura 4) a presença de uma microestrutura de matriz austenítica com uma rede de carbonetos precipitados em regiões interdendríticas. Apesar do rolo não ter uma função estrutural, é importante ressaltar que essa rede de carbonetos, em especial de partículas relativamente grandes, fragiliza o material pela criação de um meio propício à propagação de eventuais trincas. O espaçamento interpartículas foi estimado como da ordem de 50 μm , enquanto que as partículas de minério presentes na pelota podem ser tão pequenas quanto 5 μm , e, portanto, o sulcamento da matriz pelo minério é bastante provável. Uma distribuição mais homogênea de carbonetos, de tamanhos menores, além de minimizar o problema de fragilização, reduziria o espaçamento interpartículas, promovendo, em princípio, um aumento da resistência ao desgaste, respectivamente pelo aumento da macrodureza média e pela diminuição do caminho livre médio encontrado pelas partículas abrasivas na matriz austenítica.

Adicionalmente, grandes vazios de solidificação interdendríticos, de até 200 μm de comprimento, foram observados, principalmente junto à superfície interna do tubo, enquanto que pequenos vazios, com tamanhos variando entre 5 e 25 μm , foram detectados junto à superfície externa do tubo. A presença de vazios na superfície de desgaste auxilia no ancoramento de partículas, favorecendo uma possível agregação de minério.



(a)



(b)

Figura 4: Análise microscópica de dois planos metalográficos, (a) LS, (b) LT, mostrando a presença de vazios de solidificação (setas azuis) e carbonetos em regiões interdendríticas (seta vermelha).

A análise por microsonda EDX (Figura 5) das partículas de carbonetos observadas na Figura 4b (seta vermelha) indicou a presença de carbonetos de cromo e de molibdênio, conforme mostra a Tabela 4. Na matriz, não foi detectada a presença do molibdênio, indicando que este elemento está totalmente combinado com o carbono na forma de carbonetos.

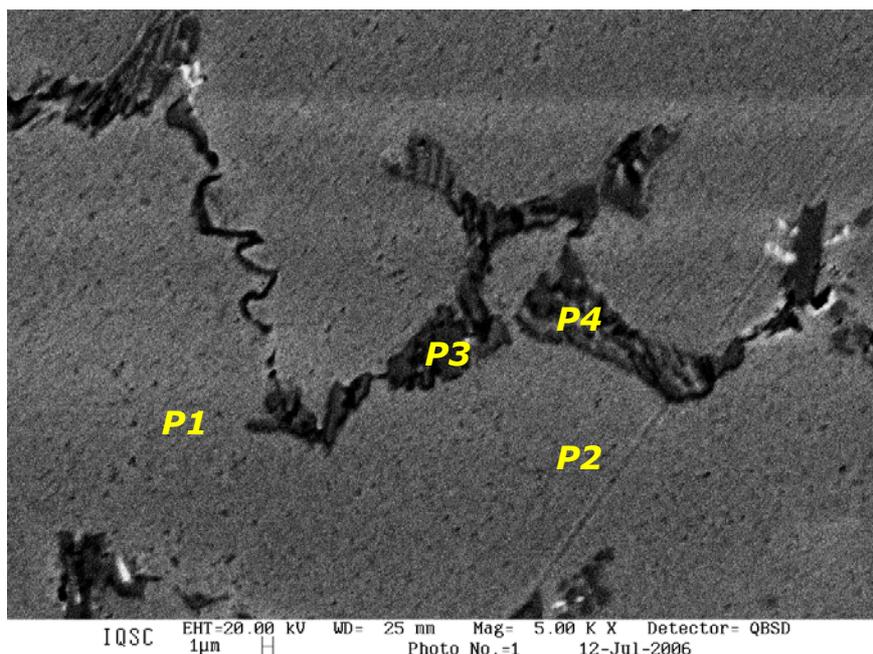


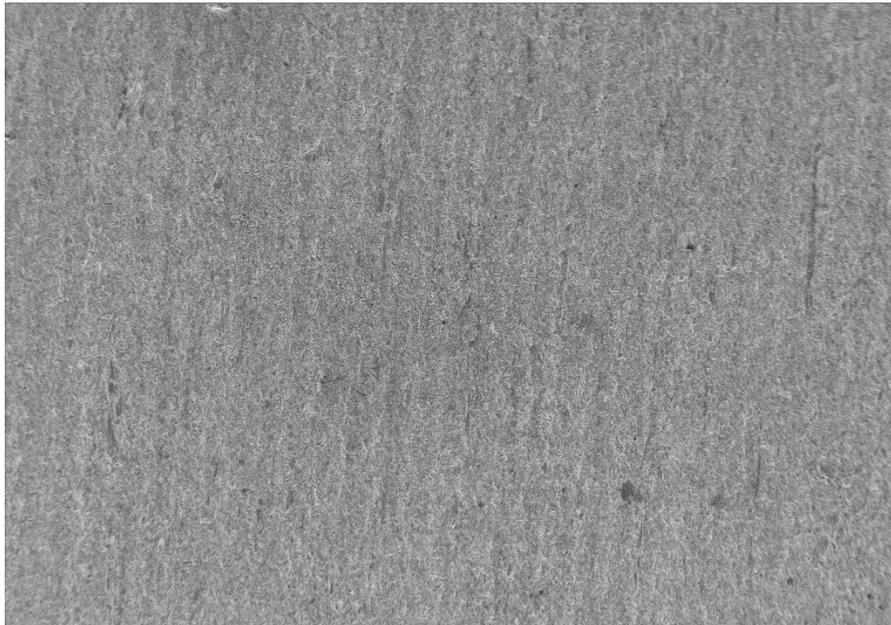
Figura 5: Regiões pontuais analisadas por EDX em amostra metalográfica do rolo classificador.

Tabela 4: Análise semi-quantitativa realizada por EDX em amostra metalográfica extraída do rolo classificador (valores aproximados em % em peso).

	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Mo
Ponto 1 (Matriz)	60	26	12	0,9	1,2	-
Ponto 2 (Matriz)	59	27	12	1	1,3	-
Ponto 3 (Carboneto)	45	44	9	0,6	1,2	1,2
Ponto 4 (Carboneto)	55	30	11	0,9	1,4	0,7

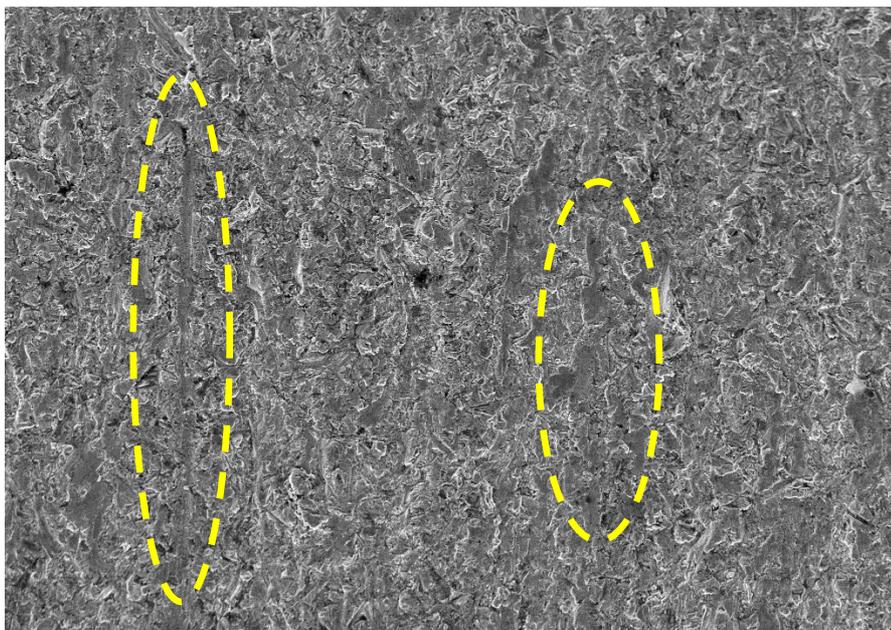
3.5 Análise por MEV

A análise por microscopia eletrônica de varredura, Figura 6, mostra em detalhes a superfície do rolo exposta ao processo de desgaste. Observa-se uma superfície com predominância de regiões sulcadas pelo abrasivo e algumas marcas de deformação plástica decorrentes da usinagem do rolo.



IQSC EHT=20.00 kV WD= 16 mm Mag= 100 X Detector= SE1
100µm Photo No.=2 17-Jul-2006

(a)



IQSC EHT=20.00 kV WD= 16 mm Mag= 500 X Detector= SE1
20µm Photo No.=4 17-Jul-2006

(b)

Figura 6: Análise por MEV, em duas ampliações diferentes de imagem, mostrando vestígios de deformação plástica provocada pela usinagem (pontilhados em amarelo em 6b) e aspecto geral do padrão de desgaste promovido na superfície do rolo.

4 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- O material recebido para análise encontra-se fora das especificações de composição química do projeto quanto aos teores de C, Ni e W;
- Análises segundo o Diagrama de Schoefer, utilizando-se um ímã, através de micrografia óptica não acusaram a presença de ferrita no aço. Porém, na faixa de composição especificada em projeto, é possível o desenvolvimento de até 15% de fase ferrítica, tornando assim o material magnético;

- Medidas de rugosidade indicam um valor de R_a muito superior ao especificado em projeto. A rugosidade da região desgastada foi maior do que a da região intacta, indicando que a rugosidade tende a aumentar no decorrer do processo de desgaste;
- O material sofre dano por desgaste abrasivo livre a dois corpos. A perda de massa se dá principalmente pelo mecanismo de sulcamento. O espaçamento entre as partículas de carbonetos da microestrutura é grande o suficiente para permitir que partículas de minério desgastem a austenita, que é a fase mais mole da liga;
- A presença de vazios de fundição favorece o ancoramento de partículas de minério sobre a superfície do rolo, contribuindo para a agregação local do minério. Em princípio, a existência de magnetismo e de altos valores de rugosidade superficial tendem a também favorecer a agregação.

5 RECOMENDAÇÕES

- Utilizar material de maior dureza e com distribuição mais refinada de carbonetos;
- Aplicar recobrimento de alta dureza sobre a superfície do rolo, tomando-se os devidos cuidados com relação às suas propriedades magnéticas e ao seu acabamento superficial finais;
- O requisito de não-magnetismo deve ser enfatizado em projeto, especificando-se os critérios analíticos e/ou experimentais para a sua precisa determinação.

BIBLIOGRAFIA

- 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 Peckner, D.; Bernstein, I. M. (1977) Handbook of stainless steels, McGraw-Hill Book Company, New York, pp.10-13.