

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE AÇO AISI 422 TRATADO TERMICAMENTE, NITRETADO E COM REVESTIMENTOS ASPERGIDOS DE CARBONETO DE CROMO-NÍQUEL

José Divo Bressan

Departamento de Engenharia Mecânica - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil. email: dem2jdb@joinville.udesc.br

Franco Wronski Comeli

TRACTEBEL ENERGIA SA - Termoelétrica Jorge Lacerda - Av. Paulo Santos Mello S/N - Capivari de Baixo/SC - CEP 88745 000- Caixa Postal 38- email: francowc@tractebelenergia.com.br

Resumo: *O presente trabalho investiga a resistência ao desgaste superficial de discos de aço AISI 422 (UNS S42200) com diferentes tratamentos térmicos, nitretação a plasma e revestimentos superficiais por aspersão térmica de Cr_3C_2-NiCr por HVOF. O ensaio de desgaste foi realizado num tribômetro tipo esfera-contra-disco. Os discos de aço 422 foram ensaiados contra esfera de zircônia de 9,75 mm de diâmetro com uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s, carga normal na esfera de 30 N, dentro de uma câmara fechada contendo sílica gel usada para remover e controlar a umidade do ar. A distância total de deslizamento percorrida em cada ensaio foi de 2400 metros, com intervalos de 200 metros para medidas de perda de massa, temperatura e umidade relativa. Foram ensaiados 15 discos de aço 422 com dimensões 60 mm de diâmetro por 4 mm de espessura e com os seguintes tratamentos superficiais: nitretação a plasma (3 discos), normalizado (3 discos), temperado e revenido (3 discos) e revestido por aspersão térmica com carboneto de cromo-níquel (5 discos). Foram realizados ensaios de micro-dureza nos discos em duas regiões (na pista e fora da pista de desgaste), a fim de se observar o comportamento da superfície de desgaste do material. As amostras de disco de aço 422 nitretadas apresentaram alta dureza superficial, 1250 HV, e boa resistência ao desgaste, comparado-se com os outros revestimentos, embora o coeficiente de desgaste $K = 0,218 \times 10^{-3}$ tenha sido elevado em relação aos discos temperados e revenidos, devido a presença de muitos poros na superfície. As amostras de disco de aço 422 temperado e revenido apresentaram coeficiente de desgaste inferior, $K = 0,070 \times 10^{-3}$, mas a taxa de desgaste foi superior. As amostras de aço 422 normalizado apresentaram a menor dureza, 325 HV, menor coeficiente de desgaste $K = 0,052 \times 10^{-3}$ e a menor taxa de desgaste $Q = 4,64 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$. As amostras de disco com revestimento aspergido de Cr_3C_2-NiCr apresentaram coeficiente de desgaste $K = 0,23 \times 10^{-3}$ semelhante ao disco nitretado, mas a taxa de desgaste foi maior e a dureza inferior: 1100 HV. As menores durezas superficiais obtidas nos discos tratados foram os temperado e revenido, 340 HV, e os discos normalizados, 325 HV. Os mecanismos de desgaste dos discos observados no MEV foram a micro-riscagem e a delaminação de flocos (descamação). Não se observou desgaste adesivo.*

Palavras-chave : *Ensaio de desgaste, aço 422, revestimentos, tratamento térmico.*

1. INTRODUÇÃO

A usina Termoelétrica Jorge Lacerda de Capivari de Baixo/SC é uma das maiores central geradora de energia elétrica do Sul do Brasil. Nas usinas termoelétricas, a turbina de geração de eletricidade por pressão de vapor é um equipamento muito importante, de tecnologia complexa, sendo considerada a principal máquina da usina em operação continuada de 24 horas por dia. Entretanto, a turbina necessita de paradas regulares para manutenção periódica e substituição de componentes mecânicos e elétricos danificados. Existem vários mancais, eixos e válvulas que

sofrem atrito e desgaste continuado durante a operação e que requerem resistência ao desgaste. O aço AISI 422 tratado termicamente é utilizado na haste de válvula de turbina termelétrica por apresentar boa combinação de propriedades mecânicas, usinabilidade, resistência a corrosão e custo relativamente baixo.

O aço liga 422 (AISI 422 / UNS S42200 / ASTM A565 Grau 616) é um aço inox martensítico endurecível por têmpera e revenimento para aplicações que requerem alta resistência mecânica em elevada temperatura de até 590 °C ⁽¹⁾. Ele apresenta também boa resistência à oxidação para operação contínua até 750 °C. As aplicações típicas do aço 422 incluem componentes mecânicos como válvula de admissão de motor à gasolina, parafusos, componentes aeroespaciais, partes de válvulas hidráulicas, rolamentos de alta precisão que podem trabalhar até 300 °C, corpo de bomba de alta pressão, eixos de bombas. É empregado também na indústria farmacêutica e de alimentos, indústria química, petroquímica, prospecção de petróleo. Nas indústrias mecânica e naval é usado em molas, grampos, parafusos, prisioneiros e mecanismos de transmissão de movimento. A presença de elementos de liga em sua composição como Ni, Mo, W e V, além do cromo, faz com que sua martensita tenha alta resistência ao amolecimento a quente. Isto possibilitou sua aplicação na fabricação de prisioneiros/parafusos, carcaças e palhetas de turbinas a vapor.

Nas aplicações citadas acima e outras como hastes, eixos, mancais, engrenagens e componentes sujeitos ao desgaste, é desejável ter alta dureza na superfície combinado com núcleo tenaz. Por meio de tratamento térmico, nitretação a plasma ou termoquímico dos aços 422 é possível se obter uma boa combinação de *alta resistência mecânica, resistência a corrosão e resistência ao desgaste*.

A resistência mecânica é normalmente definida como sendo a tensão limite de escoamento ou a tensão limite de resistência. Por sua vez, o *desgaste* é definido como sendo a “*perda progressiva de massa da superfície de um sólido em movimento relativo, levando ao dano ou a falha*”. O desgaste pode ser tanto *brando* como *severo*, dependendo das condições de contato entre as superfícies, da pressão, temperatura de contato e das durezas dos materiais. A condição de contato ou a *severidade do contato* é definido por uma equação que relaciona estas variáveis. A resistência ao desgaste dos materiais é usualmente obtida através de ensaios de desgaste num equipamento de laboratório chamado Tribômetro. Um dos ensaios padrão de laboratório que simula as condições severas de desgaste em componentes é o ensaio “pino-sobre-disco”, conforme norma ASTM G99-95 ^(2,3).

O objetivo do presente trabalho foi investigar a resistência ao desgaste de amostras de aço AISI 422 com diferentes tratamentos térmicos e revestimentos e, conseqüentemente, diferentes durezas e tenacidades, utilizando-se o ensaio de desgaste a seco de pino-sobre-disco e de acordo com a norma ASTM G99-95. Os pinos constituíram-se de esferas de zirconia de 1500 HV e a contraface foram de aço 422. A partir dos resultados experimentais, pretendeu-se identificar o melhor tratamento superficial resistente ao desgaste para aplicação na haste de válvula de turbina termelétrica.

2. ENSAIOS DE DESGASTE EM LABORATÓRIO

A resistência ao desgaste é um relevante tópico na seleção de materiais nos projetos de tribologia aplicada e, conseqüentemente, testes de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de se medir a resistência ao desgaste sob condições controladas semelhantes às condições em serviço. Por meio dos ensaios pode-se investigar os mecanismos de desgaste e classificar os materiais para determinadas aplicações.

A correlação entre os ensaios de simulação de laboratório e sua aplicação prática é de grande importância tecnológica. Entretanto, as diversas variáveis que influenciam no desgaste tornam esta correlação as vezes um tanto difícil. A resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito não são propriedades características de um material, mas dependem tanto das propriedades do material e da topografia da superfície quanto dos parâmetros do processo de desgaste como carga, temperatura, velocidade de deslizamento e meio ambiente. Os resultados experimentais do desgaste realizados em laboratório são analisados através da equação de Archad ⁽⁴⁾ ou de Rabinowicz ⁽⁵⁾ que avalia a razão de desgaste e o coeficiente de desgaste, relacionando o volume perdido acumulado por unidade de deslizamento com a resistência ao desgaste através da equação linear ⁽⁴⁾,

$$Q = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (1)$$

onde Q é o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste” (volume perdido acumulado V ou massa perdida por unidade de deslizamento S), F_N é a carga normal aplicada, H é a dureza do material mais mole e K é o coeficiente de desgaste: é adimensional e menor que 1. Em geral, a *resistência ao desgaste* é definida por $1/K$. Portanto, o *coeficiente de desgaste* é dado por,

$$K = \frac{Q \cdot H}{F_N} = K_S \cdot H \quad (2)$$

onde K_S é o *coeficiente específico de desgaste* ($K_S = Q/F_N$) cuja unidade é $\text{mm}^3/\text{m} \cdot \text{N}$. Ambos coeficientes referem-se ao material mais mole. No presente ensaio de desgaste pino-sobre-disco o material mais mole foi o disco. O volume perdido cumulativo pelo disco foi obtido por,

$$V = m/\rho \quad (m = \text{massa do disco} ; \rho = \text{densidade}) \quad (3)$$

O coeficiente de desgaste K é de importância fundamental e provê um valioso meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em diferentes sistemas tribológicos. Portanto, a equação de desgaste de Archard fornece valiosos parâmetros que descrevem o rigor do desgaste através do coeficiente K, mas a sua validade não pode ser usada para afirmar a existência ou não de um determinado mecanismo de remoção de material. É necessário o uso do microscópio ótico ou eletrônico para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Os resultados de resistência ao desgaste do aço 422 foram obtidos através da realização de ensaios de desgaste a seco em equipamento de pino-sobre-disco com uma distância total selecionada constante, um determinado valor constante de carga normal sobre o pino e uma velocidade de deslizamento também constante^(3,6). A Tabela 1 mostra os parâmetros operacionais empregados durante a execução dos ensaios. Foram ensaiados 15 discos de aço 422 com dimensões de 60 mm de diâmetro por 4 mm de espessura e com os seguintes tratamentos superficiais: nitretação a plasma (3 discos), normalizado (3 discos), temperado e revenido (3 discos) e revestido por aspersão térmica com carboneto de cromo e carboneto de cromo-níquel, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, por HVOF (5 discos). Portanto, para cada tipo de tratamento foram feitos 3 ensaios de esfera-sobre-disco.

Tabela 1- Parâmetros empregados na realização dos ensaios de desgaste.

Velocidade de deslizamento (m/s)	Carga 30 N (Kgf)	Distância total percorrida (m)	Raio da pista (mm)
0,6	2,953	2400	14,3

3.1 Obtenção dos corpos de prova (cdp's)

Pinos. Foram utilizados esferas de zircônia de 9,75 mm de diâmetro como ponta do pino conforme mostrado na Figura 1. A dureza média da esfera de zirconia foi de 1500 mHV.

Discos. A contra-face ou disco, Figura 1, foi obtido pelo corte e pré-usinagem de barra de aço 422 na condição como recebido, obtendo-se o diâmetro médio de 60 mm e espessura de 8 mm. Em seguida, uma das faces foi usinada até obter-se a espessura de 4 mm. Todos os disco foram usinados nestas dimensões estabelecidas. Na sequência, foram feitos os tratamento térmicos de tempera e revenimento, normalização. Após, nitretação a plasma e revestimento de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ por HVOF. Em seguida, os discos foram retificados e polidos. As durezas média dos substratos dos discos são vistas na Tabela 2 e a dureza final da superfície dos discos após os tratamentos estão na Tabela 4.



Figura 1. Disco ou contra face de aço 422 e esfera de zirconia presa ao suporte.

Tabela 2- Condições do tratamento térmico dos substratos do disco aço 422 e respectiva dureza.

Tratamento Térmico	Discos 06, 07, 67	Discos 08, 09, 89	Discos 10, 11	Discos 12, 13, 23	Discos 14, 15, 45
Têmpera					Como recebido da fábrica (normalizado)
homogeneização (1h)	950 °C	950 °C	950 °C	950 °C	
resfriamento óleo	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	
Revenido					
aquecimento	600 °C -1h	600°C - 1h	600°C - 1h	600°C - 1h	
resfriamento ar	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	
Dureza (mHV)	342	342	342	342	333

3.2 Microestrutura dos aços 422

Na Figura 2a observa-se a microestrutura temperada e revenida da secção transversal presente em todos os discos, exceto as séries 14, 15, 45. A microestrutura é constituída de martensita revenida de dureza 342 HV. O ataque químico metalográfico utilizado foi PICRAL. A composição química dos substratos dos discos está na Tabela 3.

Tabela 3- Composição química nominal dos discos de aço 422.

Elemento	% C	% Cr	% Ni	% Mo	% W	% V	% Mn	%Si	% Cu
ASTM	0,20	12,50	0,75	1,0	1,0	0,22	-	-	-
Medido exp.	0,22	11,52	0,49	1,09	-	0,36	1,03	0,48	0,18

3.3 Procedimentos do Ensaio de Pino-sobre-disco

Os corpos de prova seguiram um rigoroso procedimento de preparação a fim de se eliminar quaisquer vestígios de sujeira ou oxidação. Em seguida, pino e disco foram pesados numa balança analítica com resolução de 0,1 mg para determinação de sua massa inicial antes do ensaio. O ensaio foi realizado com os discos de aço AISI 422 com diferentes tratamentos superficiais. Os discos foram ensaiados contra pino cuja ponta foi uma esfera de zircônia de diâmetro 9,75 mm e microdureza Vickers 1500, com uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s (399 rpm), com uma carga normal no pino de 30 N, com um diâmetro da pista de 29 mm, dentro de uma câmara fechada com sílica gel usada para remover e controlar a umidade do ar. A distancia total percorrida no ensaio para cada disco foi de 2400 metros, sendo que com intervalos de 200 metros o ensaio era interrompido e realizavam-se as medidas de perda de massa, de temperatura e da umidade relativa (através

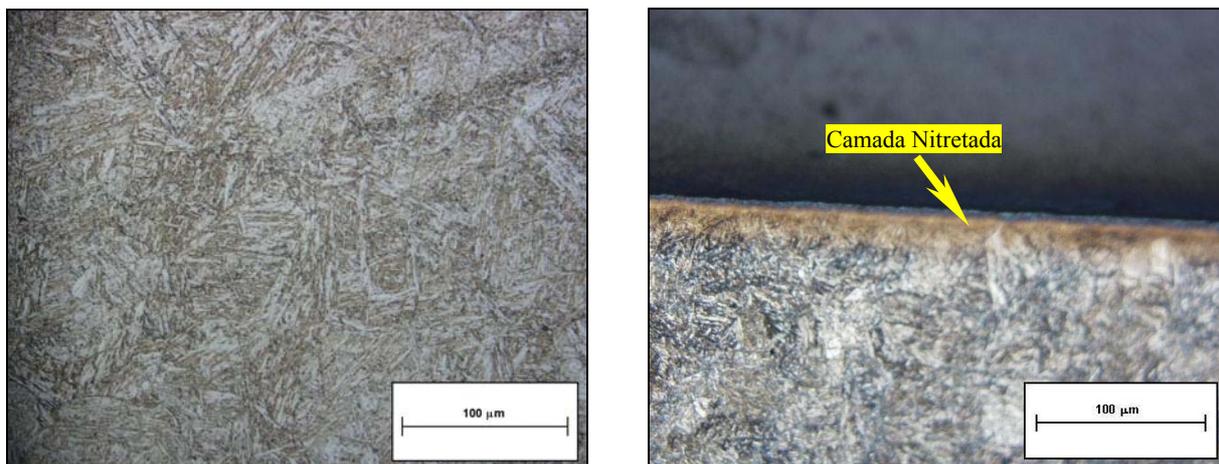


Figura 2. Microestrutura na secção transversal dos discos de aço 422. Aumento 500x. a) temperado e revenido, at. PICRAL. b) temperado, revenido e nitretação a plasma, ataque: HCl + H₂O + H₂O₂.

do Termo-Higrômetro). Logo em seguida o disco era removido e passado um jato de ar comprimido para retirada das partículas depositadas na superfície do mesmo após cada ensaio, realizando-se então a medição da largura da pista no micrometro óptico (com precisão de 0.005 mm), medição da perda de massa do disco e do pino com esfera zirconia através da balança analítica (erro máximo de 0,2 mg). O volume foi calculado por meio da equação 3. Concluído os ensaios de cada disco, todos os dados foram digitados em uma planilha no excel a fim de observar o comportamento das curvas de cada disco ensaiado. Foram medidas também as microdurezas dentro e fora da pista de desgaste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de Micro-Dureza e Metalografia

Os ensaios de micro-dureza Vickers (mHV) foram realizado nos discos a fim de se observar a variação de dureza na região central da pista de desgaste (onde ocorreu o desgaste) e a dureza na mesma superfície, mas na região fora da pista de desgaste. Estes ensaios foram feitos com cargas de 200 e 500 gramas, média de 4 valores e estão vistos na Tabela 4. As durezas dentro da pista de desgaste aumentaram significativamente nos discos temperado e revenido e discos normalizados.

A Figura 2b mostra a seção transversal do disco nitretado a plasma. A camada nitretada tem espessura de ~30 µm e a sua microdureza é de 1235 HV. O substrato é martensita revenida.

4.2 Ensaio de Esfera-contra-Disco

Os gráficos das Figuras 3 e 4 que seguem apresentam os resultados experimentais dos ensaios de esfera-contra-disco, mostrando o comportamento do desgaste dos discos de aço 422 submetidos a diferentes tratamentos superficiais. Com exceção dos discos com revestimento aspergido de Cr₃C₂-NiCr, a esfera de zirconia sofreu desgaste desprezível ou mínimo medido. As curvas relacionam a perda de volume cumulativo do disco, eq. 3, versus distância de deslizamento percorrida, Figura 3. Os discos aspergidos, discos 9 e 89, foram o que sofreram a maior taxa de desgaste. Os discos aspergidos 10 e 11 (indicados como aço 422 CrC-CrN) tiveram taxa de desgaste semelhante aos discos 8 e 9. Isto deve-se possivelmente a alta rugosidade, micro-trincas e porosidade da superfície aspergida e retificada. Os discos que tiveram as menores taxas de desgaste foram os discos como recebido (normalizado), discos 14 e 45. Em seguida aparecem os discos nitretados a plasma com taxa de desgaste levemente superior, mas inferior aos discos aspergidos. Portanto, a tenacidade do material da superfície influenciou o desgaste: apesar da alta dureza da superfície nitretada de 1250 HV, esta teve taxa de desgaste maior que a superfície do disco normalizado de 333 HV e maior tenacidade. A Figura 4, mostra a largura da pista de desgaste do disco versus distância percorrida.

Apresentam-se também os valores de micro-dureza (mHV) medidos dentro da pista de desgaste com carga de 500 gramas. Nos discos com acabamento superficial de Cr₃C₂-NiCr (discos 8, 9 e 89) houve um aumento substancial da largura da pista em relação aos demais discos devido a camada

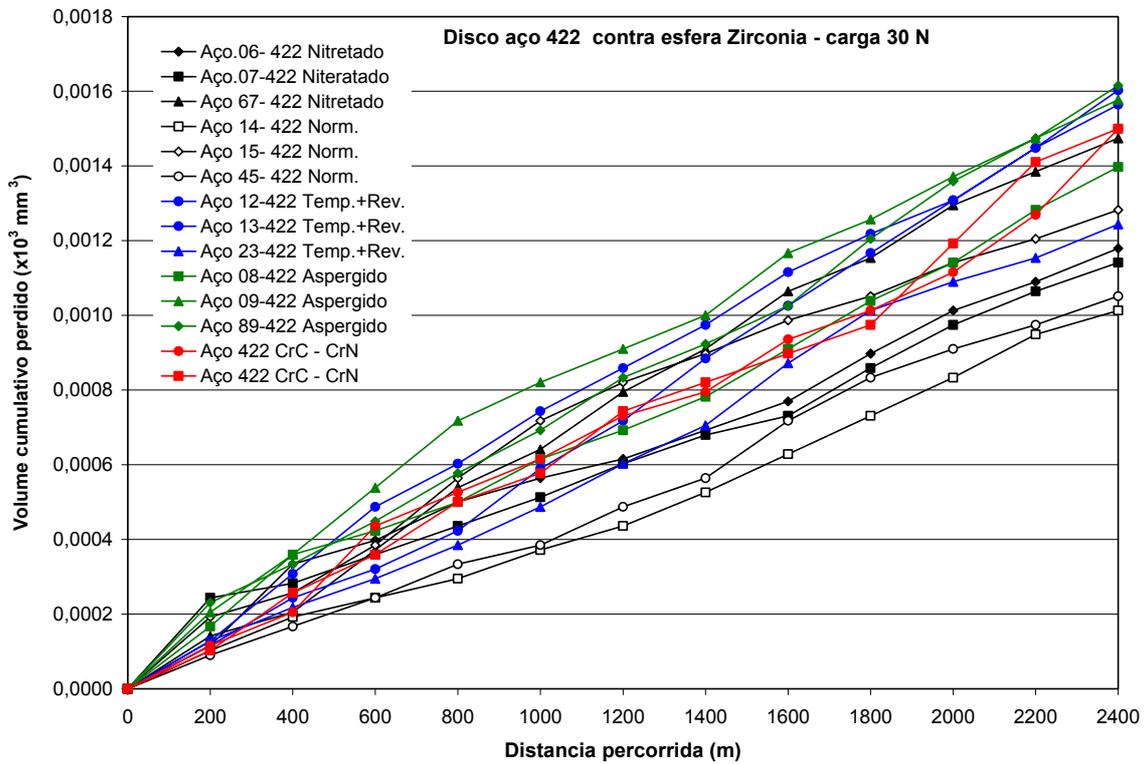


Figura 3. Ensaio de desgaste pino-sobre-disco dos discos de aço 422 com tratamento térmico ou superficial. Perda acumulada de volume dos discos versus a distância de deslizamento percorrida.

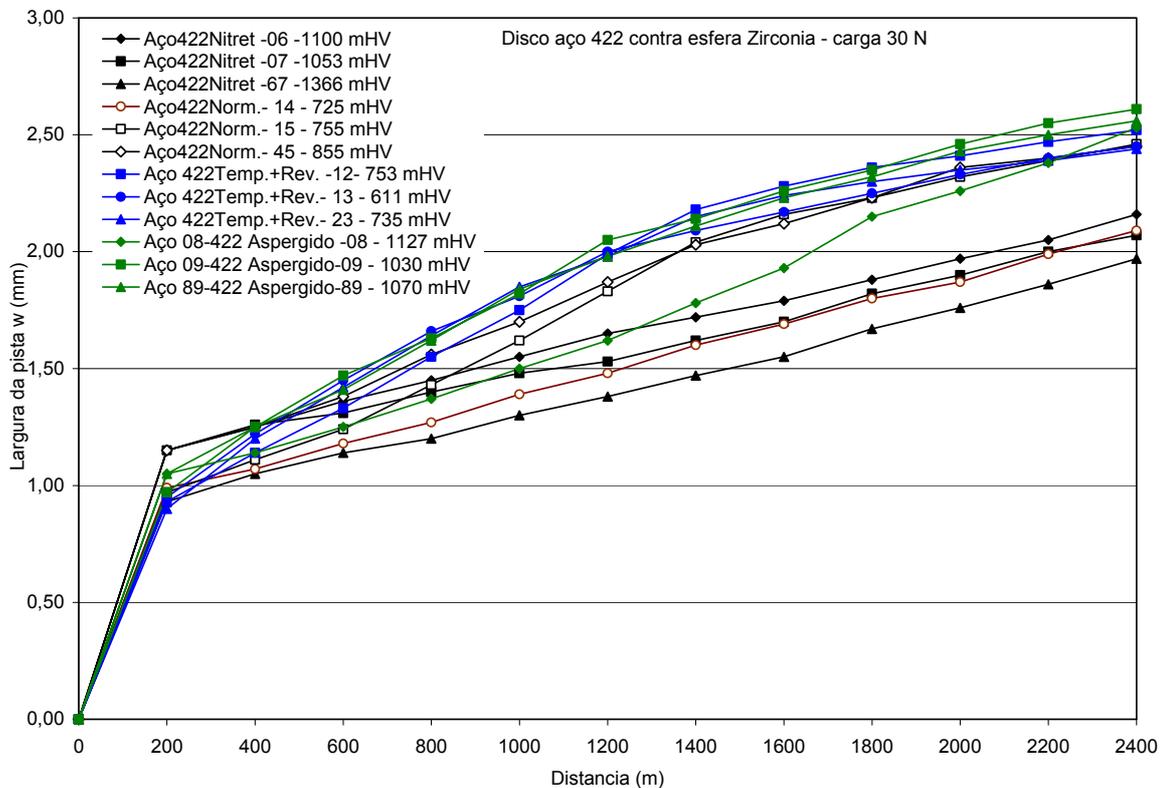


Figura 4. Largura da pista de desgaste w nos discos versus a distância percorrida para os discos de aço 422, com os valores de micro-dureza (mHV) medidos dentro da pista com carga de 500g.

apresentar maior resistência ao desgaste e maior rugosidade, provocando um grande desgaste abrasivo da esfera de zirconia e, por consequência, houve uma maior área de contato da esfera com o disco. Nos outros ensaios, o desgaste medido da esfera foi desprezível.

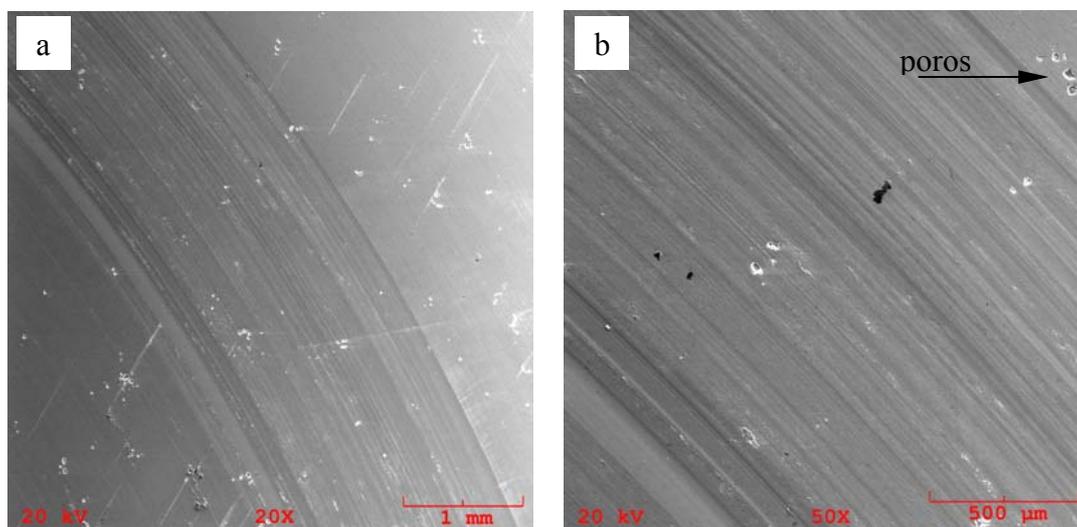


Figura 5. Pista de desgaste do disco de aço 422 nitretado. Aumento: a) 20x e b) 50x.

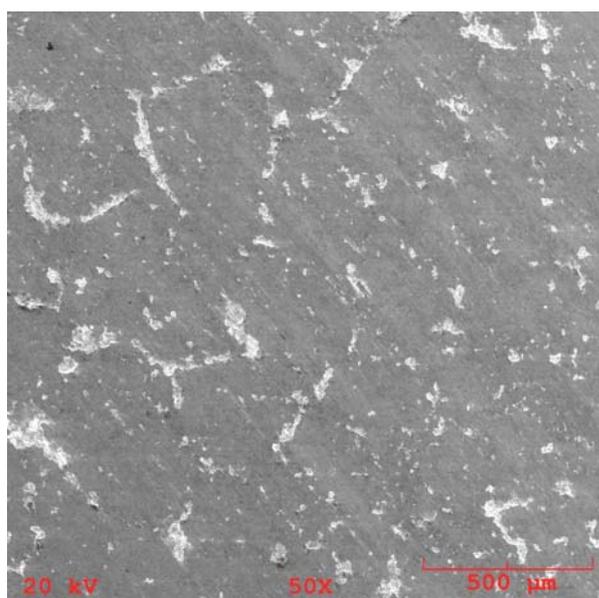


Figura 6. Pista de desgaste do disco de aço 422 aspergido. Desgaste por descamação de flocos ou lascamentos. Aumento 50x.

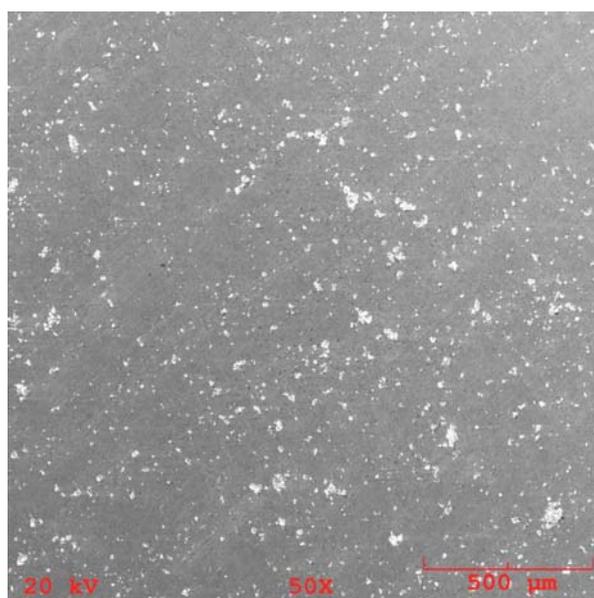


Figura 7. Superfície inicial sem desgaste do disco de aço 422 aspergido. Lascamentos e poros iniciais na superfície. Aumento 50x.

Micrografias dos Discos Desgastados: As micrografias que seguem, Figuras 5 a 8, foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da superfície antes do desgaste e na pista de desgaste de alguns dos discos fornecido para análise dos mecanismos principais de desgaste dos discos. Na Figura 5 observa-se a superfície inicial e a pista de desgaste do disco nitretado. Nota-se a presença de micro-poros tanto na superfície inicial como na pista de desgaste. Na Figura 7 verifica-se a presença de micro-poros e micro-lascamentos na superfície antes do ensaio de desgaste devido ao processo de retifica realizado após a aspersão térmica no disco 8. Na Figura 6, observa-se o aumento do mecanismo de micro-lascamentos dentro da pista de desgaste do disco aspergido 8 com o aumento das marcas danificadas. O micro-lascamento é um processo de descamação de flocos da superfície, semelhante ao observado na Figura 8.

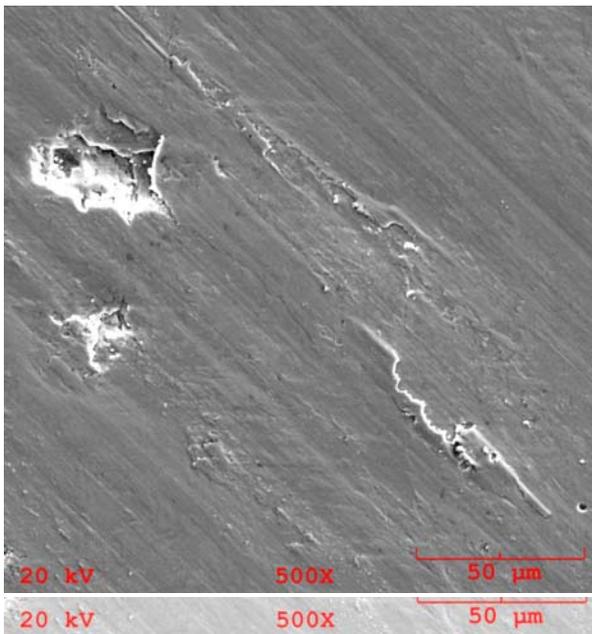


Figura 8. Pista de desgaste do disco de aço 422 nitretado. Desgaste por descamação de flocos e micro-riscagem. Aumento de 500x.

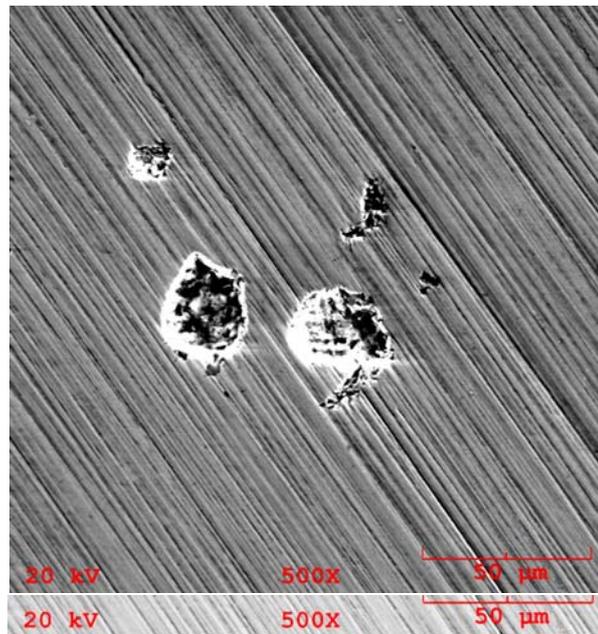


Figura 9. Superfície inicial antes do desgaste do disco de aço 422 nitretado. Porosidade e rugosidade inicial da superfície. Aumento 500x.

Na Figura 9 apresenta-se a superfície antes do desgaste como micro-poros. Na Figura 8, observam-se os mecanismos de desgaste: micro-sulcamento e o micro-lascamento de flocos⁽⁷⁾.

Com base nos resultados experimentais dos discos testados no ensaio de desgaste apresentados nas Figuras 3 e 4, observamos a seguinte ordem de taxa de desgaste das superfícies na Tabela 4, iniciando-se pelos discos que apresentaram maior taxa de desgaste, ou seja, maior perda de volume cumulativo durante os ensaios. A taxa de desgaste foi calculada, usando-se a equação (1) de desgaste. Na Tabela 4 abaixo, observam-se os valores de taxa média de desgaste Q , tomando-se o valor total medido do volume perdido do disco no ensaio de desgaste (a 2400 m), bem como os

Tabela 4. Parâmetros de resistência ao desgaste, taxa de desgaste, micro-dureza do ensaio de esfera-contra-disco para os diferentes discos de Aço AISI 422.

Tipo de Superfície no disco de Aço 422	Taxa média de Desgaste $Q = V/S$ (mm^3/m)	Valor Médio da Taxa desgaste Q (mm^3/m)	Coeficiente de Desgaste Médio K	Microdureza da superfície disco (mHV – 500g)		Resistência Média ao Desgaste $1/K$
				Na Pista	Fora da Pista	
Nitretado - 06	$4,92 \times 10^{-4}$			1100	1245	
Nitretado - 07	$4,75 \times 10^{-4}$	$5,26 \times 10^{-4}$	$0,218 \times 10^{-3}$	1053	1145	$4,59 \times 10^3$
Nitretado - 67	$6,12 \times 10^{-4}$			1053	1315	
Aspergido - 08	$5,83 \times 10^{-4}$			1127	1090	
Aspergido - 09	$6,57 \times 10^{-4}$	$6,38 \times 10^{-4}$	$0,237 \times 10^{-3}$	1030	1085	$4,22 \times 10^3$
Aspergido - 89	$6,73 \times 10^{-4}$			1070	1157	
Aspergido -10	$6,25 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-4}$	$0,232 \times 10^{-3}$	928	1105	$4,31 \times 10^3$
Aspergido -11	$6,25 \times 10^{-4}$			873	1125	
Temp.+Reven.-12	$6,67 \times 10^{-4}$			753	352	
Temp.+Reven.-13	$6,50 \times 10^{-4}$	$6,11 \times 10^{-4}$	$0,070 \times 10^{-3}$	611	347	$14,28 \times 10^3$
Temp.+Reven.-23	$5,17 \times 10^{-4}$		$(0,148 \times 10^{-3})$	735	327	$(6,75 \times 10^3)$
Normalizado -14	$4,21 \times 10^{-4}$			725	325	
Normalizado -15	$5,33 \times 10^{-4}$	$4,64 \times 10^{-4}$	$0,052 \times 10^{-3}$	755	320	$19,23 \times 10^3$
Normalizado -45	$4,37 \times 10^{-4}$		$(0,121 \times 10^{-3})$	855	355	$(8,26 \times 10^3)$

valores de microdureza nas regiões da pista de desgaste e fora da pista, juntamente com os valores calculados médios dos coeficientes de desgaste K. Nesta tabela mostram-se também os valores de resistência ao desgaste definido por $1/K$. Os valores entre parênteses referem-se a dureza na pista.

De acordo com os resultados vistos na Tabela 4, os discos de aço AISI 422 temperados e revenidos e os discos como recebidos, normalizados, apresentaram os *menores coeficientes de desgaste K da ordem de* $0,070 \times 10^{-3}$ e $0,052 \times 10^{-3}$ respectivamente, para uma carga normal de 30 N. Isto foi devido ao grande aumento da dureza por encruamento na pista durante os ensaios ou devido a eliminação da camada superficial de menor dureza e revelação de camada mais interna de maior dureza do disco tratado termicamente: *a dureza do disco aumentou de aproximadamente 340 HV para 700 HV e 720 HV dentro da pista, após ensaio*. Se usarmos estas últimas durezas na pista, o *coeficiente de desgaste K aumenta para* $0,148 \times 10^{-3}$ e $0,121 \times 10^{-3}$ respectivamente.

Os discos de *aço 422 nitretado* apresentaram a *maior dureza Vickers superficial: 1250 HV*. Este *valor médio* é semelhante aos valores encontrados para o aço rápido nitretado, 1300 HV. O aço 422 nitretado também apresentou a menor largura da pista de desgaste e o desgaste da esfera desprezível. Isto mostra sua muito boa resistência ao desgaste, a segunda menor taxa de desgaste, embora tenha um coeficiente de desgaste razoável, $K = 0,218 \times 10^{-3}$, comparado com os outros tratamentos. Entretanto, *excluindo-se os primeiros 200 m do ensaio*, a *taxa de desgaste do aço nitretado torna-se* $Q = 4,3 \times 10^{-4}$, idêntica ao aço 422 normalizado como mostra a Tabela 4, e o coeficiente de desgaste diminui para $K = 0,16 \times 10^{-3}$. Um fator que deve ter influenciado a resistência ao desgaste do aço 422 nitretado foi a baixa tenacidade da camada e a presença de muitos poros na superfície do disco, como mostra a Figura 9. Talvez seria importante confirmar estes valores com mais algumas réplicas desse material com mínima porosidade superficial.

Em relação aos mecanismos de desgaste por deslizamento e abrasivo que ocorreram nos discos durante os ensaios conforme Figuras 3 a 7, constatamos os seguintes mecanismos: *micro-riscagem e micro-delaminação de flocos* (descamação). Na Figura 3 nota-se o mecanismo de *desgaste abrasivo* por micro-riscagem devido a partículas duras provenientes da microestrutura do disco ou da esfera de zircônia. Não foi observado o *desgaste adesivo* e isto se deve a esfera de zircônia ser quimicamente inerte com os materiais da superfície dos discos. A escolha da esfera foi feita com o propósito de eliminar este tipo de mecanismo de desgaste. Entretanto, numa situação de desgaste contra metal, certamente o desgaste adesivo estará presente e aumentará muito a taxa de desgaste.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os ensaios de esfera-contra-disco realizados com carga de 30 N nos discos de aço AISI 422 com diferentes tratamentos superficiais contra esfera de zircônia, os valores de microdureza e as observações no MEV, as seguintes conclusões podem ser ditas:

a) As amostras de disco de aço 422 nitretado a plasma tiveram alta dureza superficial média de 1250 HV comparado com a dureza de 340 HV do disco temperado e revenido. O disco nitretado apresentou também boa resistência ao desgaste, comparando-se a sua taxa média de desgaste de $5,26 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ com os outros discos, embora o coeficiente de desgaste, $K = 0,218 \times 10^{-3}$, tenha sido alto devido a dureza e presença de muitos poros na superfície. Outros testes são necessários.

b) As amostras de disco de aço 422 temperado e revenido apresentaram coeficiente de desgaste de $K = 0,070 \times 10^{-3}$, menor que o nitretado, mas a taxa de desgaste de $6,11 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ foi superior.

c) As amostras de disco de aço 422 normalizados apresentaram o menor coeficiente de desgaste de $K = 0,052 \times 10^{-3}$ e também a menor taxa média de desgaste de $Q = 4,64 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.

d) As amostras de disco com revestimento aspergido de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ apresentaram coeficiente de desgaste semelhante ao disco nitretado, $K = 0,23 \times 10^{-3}$, mas a taxa média de desgaste foi maior e a dureza de 1100 HV foi inferior.

e) As menores durezas superficiais obtidas nos tratamentos dos discos de aço 422 foram os discos tratados termicamente por tempera e revenido, 340 HV, e os discos normalizados, 325 HV.

f) Os mecanismos de desgaste observados no ensaio de deslizamento e abrasivo dos discos foram a micro-riscagem e a delaminação de micro-flocos (descamação). Não foi observado o desgaste adesivo. Isto se deve a baixo coeficiente de atrito e baixa afinidade química da zircônia.

Finalizando, num contato disco de aço com pino de aço, certamente ocorrerá o desgaste adesivo além dos outros mecanismos. Isto aumentará em muito a taxa de desgaste dos discos de aço 422.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro recebido da UDESC, da TRACTEBEL, da FAPESC e do CNPq.

7. REFERÊNCIAS

1. Metals Handbook, Desk Edition, ASM, Heat-Resistant Materials, p. 16.1, 1997.
2. ASTM, Designation: G99-95; Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, p. 336-390, 1995.
3. Bressan, J.D. e Hesse, R., Construction and validation tests of a pin-on-disc equipment. In. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001, Uberlândia/MG, dezembro/2001.
4. Hutchings, I.M., Tribology: Friction and wear of engineering materials. Arnold, 1995.
5. Rabinowicz, E., Friction and wear of materials. New York: Wiley; 1965.
6. Williams, J.A., The laboratory simulation of abrasive wear. Tribotest Journal, 3-3, p. 267, 1997.
7. Zum Gahr, K.H., Wear by hard particles. Tribology International, 31, p. 587-596, 1998.

STUDY OF WEAR RESISTANCE OF 422 STEEL HEAT TREATED, NITRIDED AND WITH THERMAL SPRAY OF NICKEL AND CHROMIUM CARBIDES

José Divo Bressan

Departamento de Engenharia Mecânica - Udesc Joinville – Campus Universitário, 89.223-100 – Joinville/SC – Brasil. email: dem2jdb@joinville.udesc.br

Franco Wronski Comeli

TRACTEBEL ENERGIA SA - Termoelétrica Jorge Lacerda - Av. Paulo Santos Mello S/N - Capivari De Baixo/SC - CEP 88745 000 - Caixa Postal 38 - email: francocomeli@ig.com.br

Abstract: Present work investigates the surface wear resistance of 422 steel discs (UNS S42200) with various heat treatments, plasma nitriding and Cr₃C₂-NiCr coating by HVOF thermal spraying. The wear tests were carried out in a ball-on-disc apparatus. The 422 steel discs were tested against zirconia ball of diameter 9,75 mm and Vickers micro-hardness of 1500 HV, sliding velocity of 0,6 m/s, normal load of 30 N, wear track diameter of 29 mm, inside a closed camera containing silica gel to remove and control the air humidity. 15 discs with the dimensions as diameter of 60 mm, thickness of 4 mm and with the following surface treatment were tested: plasma nitriding (3 discs), normalized (3 discs), quenched and tempered (3 discs) and coated by thermal spraying of chromium-nickel carbide (6 discs). Vickers micro-hardness tests on two disc regions (in the wear track and outside) were performed in order to observe the material surface behavior with the various treatments. The nitrided disc specimens showed high surface hardness of 1250 HV and good wear resistance compared to the other coating process although its wear coefficient $K = 0,218 \times 10^{-3}$ is higher, compared to the quenched and tempered discs, due possibly to the surface porosity. The quenched and tempered discs exhibited lower wear coefficient $K = 0,070 \times 10^{-3}$, but higher wear rate. The normalized disc specimens presented the lowest hardness, 325 HV, but the lowest wear coefficient, $K = 0,052 \times 10^{-3}$, and lowest wear rate $Q = 4,64 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$. The discs coated with Cr₃C₂-NiCr showed a similar wear coefficient, $K = 0,23 \times 10^{-3}$, to the nitrided disc but the wear rate was higher and lower hardness of 1100 HV. The lowest obtained surface hardness on the 422 steel discs were the disc heat treated by quenching and tempering, 340 HV, and the normalized discs, 325 HV. The wear mechanisms observed by SEM in the disc tests were the micro-grooving and micro-delamination by flakes. Adhesion wear mechanism was not observed.

Key-words : Wear test, 422 steel, coatings, heat treatment.