

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS SUPERFICIAIS NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE AÇO RÁPIDO AISI M2 UTILIZADO EM FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A FRIO¹

Carlos Augusto Silva de Oliveira²

Leônidas Cayo Mamani Gilapa³

Rafael Gomes König⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito de revestimentos superficiais na resistência ao desgaste do aço rápido AISI M2, amplamente utilizado na fabricação de punções e matrizes para a conformação mecânica a frio. Tendo em vista que a abrasão é o mecanismo básico de desgaste predominante nos processos de conformação, foram selecionados ensaios de desgaste normalizados que permitiram a avaliação da perda de material dos corpos de prova em função, principalmente, da ação deste mecanismo. Corpos de prova fabricados com o aço AISI M2 foram revestidos com três diferentes tipos de revestimentos superficiais, o nitrato de titânio, o carbonitrato de titânio e o nitrato de cromo, aplicados pelo processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.). Estes corpos de prova foram submetidos a dois diferentes ensaios de desgaste em escala laboratorial, conforme as normas ASTM G65 – Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva e ASTM G99 – Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco. Após a realização dos ensaios, foi possível determinar as curvas de evolução do desgaste da camada e do substrato para cada tipo de revestimento superficial analisado. Constatou-se que os diferentes revestimentos superficiais, em função de suas propriedades específicas, proporcionam diferentes taxas de desgaste para o material do substrato. O carbonitrato de titânio, nos dois ensaios analisados, apresentou o melhor desempenho, permitindo menores taxas de desgaste.

Palavras-chave: Revestimentos superficiais; Conformação mecânica; Abrasão; Ensaios de desgaste.

EFFECT OF COATINGS ON THE WEARING RESISTANCE OF M2 HIGH SPEED STEEL FOR COLD FORGING TOOLS

Abstracts

The purpose of this work was study the effect of hard coatings on wear of high speed HSS steel (AISI M2), used to manufacture cold forging punches and dies. As abrasion is the principal wear mechanism at cold forging process, were selected standard wear tests to evaluate the lost of material from specimens simulating the action of this wear mechanism. Specimens manufactured with high speed HSS steel (AISI M2) were coated with specimens were tested with two different standard wear tests, according to ASTM G65 – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand-Rubber Wheel Apparatus and ASTM G99 - Standard Test Method for Wear with a Pin-on-Disk Apparatus standards. After laboratorial tests, was possible to determine the wear evolution curves of hard coating film and substrate for each hard coating studied. Different coatings, due their specific properties, provide different wear rates of material. The titanium carbonitride, for both tests, presented the best performance, with the smallest wear rates.

Key words: Hard coatings; Cold forging; Abrasion; Wear tests.

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

² *Dsc, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.*

³ *Mestre em Engenharia, Professor da SOCIESC.*

⁴ *Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC.*

⁵ *Coordenador de Engenharia da CISER Parafusos e Porcas.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de ferramentas e componentes influencia diretamente a produtividade e a eficiência dos equipamentos e processos de manufatura.^[1]

Um modo de se aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão é através da Engenharia de Superfícies.^[2] Os tratamentos superficiais podem promover alterações significativas nas propriedades mecânicas, térmicas e químicas das ferramentas.^[3]

As indústrias do setor metal-mecânico tradicionalmente utilizam técnicas de modificação superficial, visto que as ferramentas de conformação, injeção ou corte, estão sujeitas ao desgaste e corrosão intensos, em função do processo e meio em que trabalham.

A utilização de tratamentos superficiais possibilita o aumento na eficiência dos processos produtivos, considerando-se que as propriedades obtidas com os revestimentos refletem no aumento da vida útil das ferramentas, no menor número de *setups* e na redução da ocorrência de falhas e paradas indesejadas da produção. Além disso, obtém-se um produto final de melhor qualidade e acabamento. Diante destas vantagens, os custos inerentes à aplicação dos tratamentos superficiais são, na grande maioria dos casos, compensados, estabelecendo uma relação custo-benefício favorável.

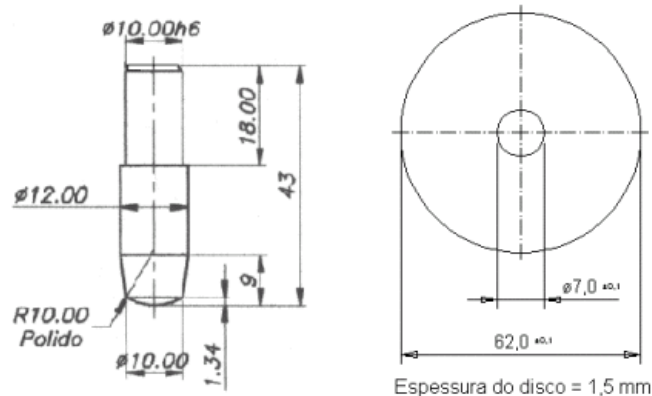
O presente trabalho avaliou comparativamente a resistência ao desgaste obtida com a aplicação de três diferentes revestimentos superficiais, o nitreto de titânio, o carbonitreto de titânio e o nitreto de cromo, aplicados pelo processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.). As resistências ao desgaste destes revestimentos foram avaliadas através da realização de ensaios de desgaste conforme as normas ASTM G 65 - Ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva e ASTM G 99 - Ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaio de Desgaste Pino-Sobre-Disco

As configurações geométricas dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste pino-sobre-disco são apresentadas na Figura 1.^[4] A avaliação do efeito dos revestimentos superficiais na resistência ao desgaste foi realizada a partir do ensaio de 2 (dois) conjuntos (pino e disco) de corpos de prova para cada revestimento. Foram ensaiados no total seis conjuntos de corpos de prova, tendo em vista que o estudo avaliou o efeito de três revestimentos superficiais (nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio).

Os pinos foram fabricados com aço rápido AISI M2, temperados e revenidos, com dureza na faixa de 61 a 63 HRC. A composição química média do aço rápido AISI M2 é apresentada na Tabela 1.^[5] Após a fabricação, os pinos foram revestidos através do processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.).



Fonte: DAL COMUNI, J. F.; FAGUNDES, T. A., 2004.

Figura 1: Configurações geométricas do pino e do disco utilizados no ensaio de desgaste.

Tabela 1. Composição química média do aço rápido AISI M2.

%C	%Mn	%Mo	%W	%Cr	%V
0,89	0,30	4,90	6,20	4,20	1,80

Fonte: VILLARES METALS, 2003.

Os discos foram fabricados em aço carbono SAE 1075, cuja composição química é apresentada na Tabela 2,^[6] com durezas variando entre 73 e 77 HRA. Os discos, ao contrário dos pinos utilizados neste mesmo ensaio, não foram revestidos superficialmente.

Tabela 2. Composição química média do aço carbono SAE 1075.

%C	%Mn	%P	%Si	%Cr	%B	%S
0,70/0,80	0,40/0,70	0,04 máx.	-----	-----	-----	0,05 máx.

Fonte: SAE J403, 1995.

O equipamento utilizado no ensaio de desgaste pino-sobre-disco é apresentado na Figura 2.^[4] Neste equipamento, o disco é rotacionado em seu próprio eixo, enquanto o pino é mantido fixo.



Fonte: DAL COMUNI, J. F.; FAGUNDES, T. A., 2004.

Figura 2: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Para a realização do ensaio, os seguintes parâmetros foram adotados:

- Carga: 20 N;
- Rotação: 600 r.p.m.;
- Distância percorrida: 2.000 m.

A distância percorrida refere-se a distância linear equivalente que o pino percorreu através da rotação do disco em seu próprio eixo. As medições de perda de massa foram realizadas a cada 200 m percorridos, totalizando assim dez medições para cada conjunto de pino e disco. A conversão da perda de massa em perda volumétrica foi realizada utilizando o valor de 7,85 g/mm³ como densidade do aço rápido AISI M2.

2.2 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva

O princípio de funcionamento deste ensaio baseia-se no contato de um disco metálico revestido em sua superfície com uma borracha, com uma rotação específica, com um corpo de prova retangular de 25,4 mm de largura, 76,2 mm de comprimento e 6 mm de espessura. O corpo de prova é pressionado contra o disco em rotação através de um braço que permite a acomodação de massas padrão. Um fluxo de areia abrasiva, de composição e tamanho de grãos controlados, é introduzido entre as superfícies do corpo de prova e do disco.

Os corpos de prova utilizados neste ensaio de desgaste também foram fabricados em aço rápido AISI M2, conforme descrito no ensaio anterior, tendo o mesmo tratamento térmico e revestimentos superficiais aplicados nos pinos do ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

O número de corpos de prova a serem ensaiados, para uma confiabilidade de 95% dos resultados dos testes, foi obtido através da seguinte expressão:

$$n = (1,96.V/e)^2$$

onde:

n = número de corpos de prova;

V = coeficiente de variação, %;

e = erro permitido de amostras, %.

Para a realização deste trabalho, foi considerado um coeficiente de variação de 8% e um erro permitido de amostras de 8%, obtendo-se o número de corpos de prova igual a 4. Assim, para cada tipo de revestimento superficial foram preparados 4 corpos de prova, totalizando 12 corpos de prova ensaiados.

A Figura 3 apresenta o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 4: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios foram:

- Tipo de abrasivo: Areia com granulação 50 (0,3 mm);
- Fluxo de abrasivo: 350 g/minuto;
- Rotação do disco: 200 r.p.m.

A quantidade de desgaste foi determinada através da medição das massas dos corpos de prova antes e após a execução de cada etapa do ensaio. A conversão da perda de massa em perda volumétrica foi realizada utilizando o valor de $7,85 \text{ g/mm}^3$ como densidade do aço rápido AISI M2.

2.3 Revestimentos Superficiais

As características nominais dos revestimentos superficiais, nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio, analisados neste trabalho, são apresentadas na Tabela 3.^[7] Estes revestimentos foram aplicados pela BRASIMET COM. & IND. S.A., através da técnica P.V.D. de desintegração catódica por *magnetron sputtering*, com temperatura de 500°C para os três revestimentos. Estas foram as únicas informações repassadas pelo fornecedor. As seções 2.1 e 2.2 apresentam algumas propriedades do substrato utilizado, o aço rápido AISI M2.

A microdureza destes revestimentos superficiais foi avaliada experimentalmente através de medições nos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva, em regiões não submetidas ao desgaste. Foram realizadas dez medições em cada corpo de prova, totalizando quarenta medições para cada revestimento superficial. Para a realização destas medições, utilizou-se um microdurômetro do fabricante Shimadzu, modelo HMV 2, com carga de 50 g.

Tabela 3. Características nominais dos revestimentos superficiais, conforme fornecedor.

Revestimento Superficial	Microdureza a [HV 0,05]	Espessura de Camada [μm]	Coefficiente de Atrito (contra o aço 52100)	Temperatura de Operação Máxima [$^\circ\text{C}$]
Nitreto de Titânio	2.500	1,0 – 6,0	0,5	550
Nitreto de Cromo	2.300	1,0 – 20,0	0,4	450
Carbonitreto de Titânio	3.000	1,0 – 4,0	0,4	700

Fonte: DUROTIN. BRASIMET, 2004.

3 RESULTADOS

3.1 Microdureza

Os valores encontrados experimentalmente são apresentados na forma de um histograma, conforme a Figura 5, com o intuito de possibilitar a avaliação da dispersão dos resultados. Os valores médios de microdureza e seus respectivos desvios padrões são mostrados na Tabela 4.

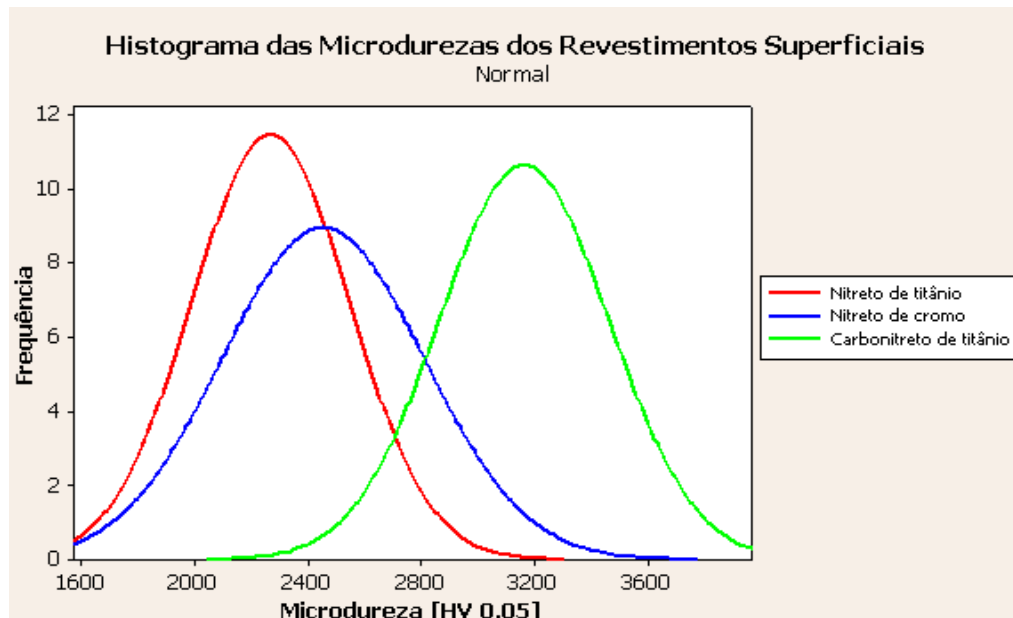


Figura 5: Histograma dos valores de microdureza dos revestimentos superficiais.

O valor médio de microdureza encontrado para o carbonitreto de titânio foi equivalente a aproximadamente 4,3 vezes a dureza superficial encontrada nos corpos de prova antes da aplicação desse revestimento superficial. Para o nitreto de cromo e de titânio, o acréscimo de dureza promovido pela utilização dos revestimentos superficiais foi de 3,3 e 3,1 vezes, respectivamente.

Tabela 4. Valores médios e desvio padrão dos resultados dos ensaios de microdureza.

Revestimento Superficial	Valores Médios de Dureza Experimentais [HV 0,05]	Desvio Padrão Experimental [HV 0,05]
Nitrito de Titânio	2.269	278,7
Nitrito de Cromo	2.455	356,4
Carbonitreto de Titânio	3.164	299,9

3.2 Ensaio de Desgaste Pino-Sobre-Disco

As perdas volumétricas acumuladas após a realização deste ensaio foram bastante reduzidas, quando comparados ao volume inicial dos pinos. Os resultados são apresentados na Figura 6 e na Tabela 5. Percentualmente, as variações foram de 1,56,

0,46 e 0,34% em relação aos volumes iniciais dos pinos revestidos com nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio, respectivamente.

Tabela 5. Perda volumétrica média dos pinos após realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Distância Percorrida [m]	Perda de Volume Acumulada nos Pinos Revestidos com Nitreto de Titânio [mm ³]	Perda de Volume Acumulada nos Pinos Revestidos com Nitreto de Cromo [mm ³]	Perda de Volume Acumulada nos Pinos Revestidos com Carbonitreto de Titânio [mm ³]
0	0,0000	0,0000	0,0000
200	0,0318	0,0064	0,0064
400	0,0573	0,0191	0,0127
600	0,1019	0,0382	0,0255
800	0,1210	0,0637	0,0510
1.000	0,2102	0,0764	0,0510
1.200	0,2866	0,1019	0,0637
1.400	0,3503	0,1083	0,0828
1.600	0,3949	0,1210	0,0955
1.800	0,4522	0,1338	0,1019
2.000	0,5032	0,1465	0,1083
Perda de Volume Acumulada em Relação ao Volume Inicial dos Pinos [%]	1,56	0,46	0,34

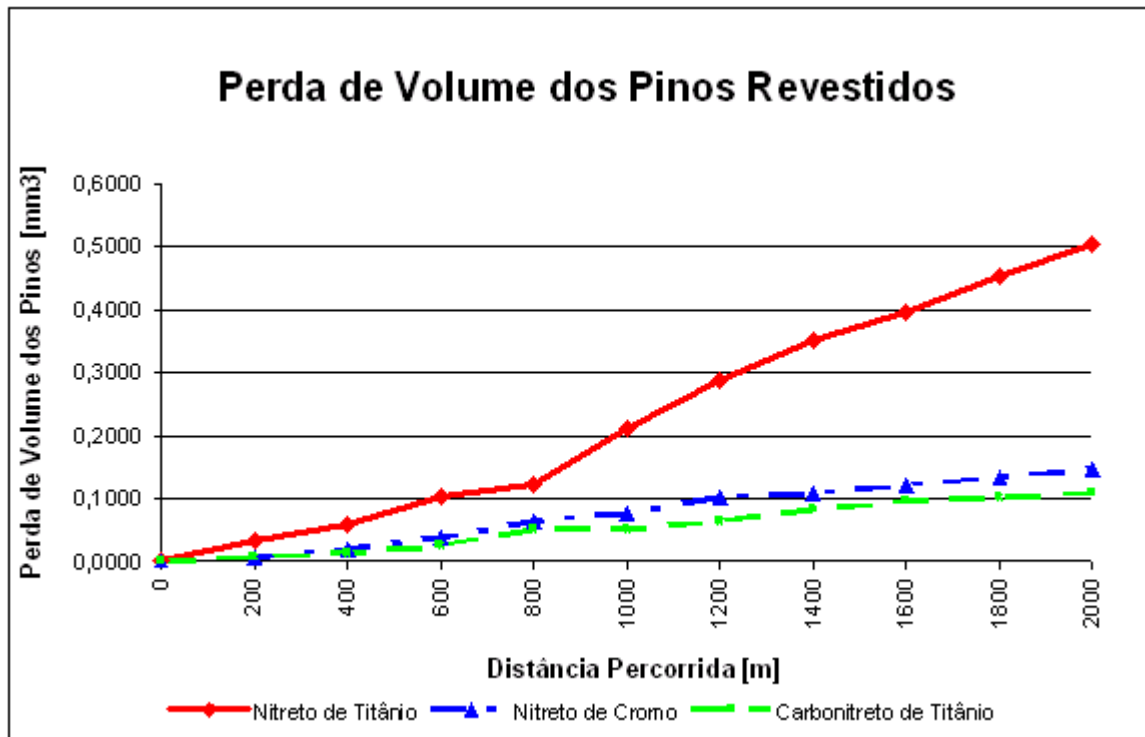


Figura 6: Evolução da perda volumétrica dos pinos durante o ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela 5, pode-se verificar que os pinos revestidos com carbonitreto de titânio tiveram uma perda volumétrica total 364,71% menor que a perda volumétrica total do nitreto de titânio e 35,29% menor que a perda total do nitreto de cromo. Estas diferenças podem estar associadas a maior dureza superficial do carbonitreto de titânio que, conforme apresentado na Figura 5 e na Tabela 4, encontra-se em torno de 30,0% superior a dureza dos outros dois revestimentos superficiais.

A perda de volume dos pinos proporcionada pelo nitreto de titânio foi 243,48% superior à perda de volume dos pinos revestidos com nitreto de cromo. Este desempenho superior do nitreto de cromo pode estar associado também à maior dureza superficial, Figura 5 e Tabela 4, e menor coeficiente de atrito, Tabela 3, encontrados neste revestimento.

A Figura 6 mostra também que as curvas de evolução do desgaste para os pinos revestidos com nitreto de cromo e com carbonitreto de titânio são caracterizadas por um crescimento linear em função da distância percorrida, com pequenas e quase constantes taxas de desgaste. Percebe-se que a curva de desgaste do nitreto de titânio pode ser dividida em dois estágios distintos com as seguintes características:

1° Estágio: até 800 metros percorridos, apresentando uma perda de material a taxas de desgaste baixas; neste estágio está ocorrendo o desgaste da camada do revestimento superficial aplicada sobre os pinos;

2° Estágio: a partir de 800 metros percorridos, com perda de material a taxas de desgaste bem mais elevadas que as taxas encontradas no 1° Estágio. Esta situação deve-se provavelmente ao decréscimo da pressão de contato nominal na superfície dos pinos [1]. Este estágio é caracterizado pelo desgaste do substrato basicamente.

Portanto, acredita-se que as camadas superficiais de carbonitreto de titânio e nitreto de cromo tiveram influência significativa na perda de volume dos pinos até o final do ensaio, ajudando a manter baixas as taxas de desgaste. No caso do nitreto de titânio percebe-se, através da Figura 6, o crescimento acentuado da curva de perda de volume a partir de 800 metros percorridos, reforçando a idéia de que o efeito deste revestimento superficial ocorreu apenas nos primeiros metros do ensaio.

3.3 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva

A Tabela 6 apresenta as perdas de volume dos corpos de prova obtidas com a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Tabela 6. Perda volumétrica média dos corpos de prova através do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Tempo de Ensaio [s]	Perda de Volume Acumulada nos Corpos de Prova Revestidos com Nitreto de Titânio [mm ³]	Perda de Volume Acumulada nos Corpos de Prova Revestidos com Nitreto de Cromo [mm ³]	Perda de Volume Acumulada nos Corpos de Prova Revestidos com Carbonitreto de Titânio [mm ³]
30	0,3439	0,0467	0,0339
60	1,2186	0,1231	0,0636
90	2,3397	0,2547	0,0891
120	3,8853	0,8322	0,3142
600	21,0318	16,2080	13,9150
Perda de Volume Acumulada em Relação ao Volume Inicial dos Corpos de Prova [%]	0,28	0,22	0,19

As Figuras 7 e 8 mostram representações gráficas dos resultados apresentados na Tabela 6.

A resistência ao desgaste dos revestimentos superficiais é avaliada, segundo recomendações da norma ASTM G65,^[8] nos 30 primeiros segundos de ensaio. Percebe-se, através da Figura 7, que o nitreto de titânio teve influência na redução do desgaste até o intervalo de tempo entre 30 e 60 segundos. Já o nitreto de cromo e o carbonitreto de titânio possuem influência considerável na redução do desgaste dos corpos de prova até o intervalo de tempo entre 90 e 120 segundos de ensaio.

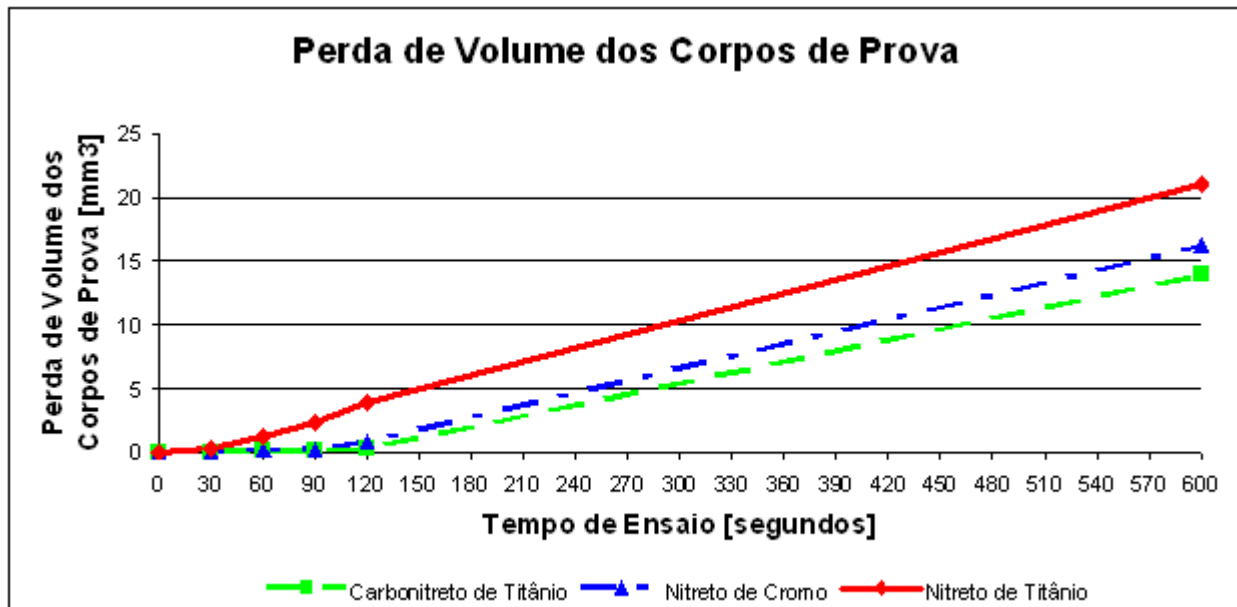


Figura 7: Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova durante o ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Os corpos de prova revestidos com o nitreto de titânio, assim como no ensaio de desgaste pino-sobre-disco, apresentaram os piores desempenhos. Em apenas 30 segundos de ensaio, estes apresentaram perdas volumétricas equivalentes àquelas encontradas somente após 90 segundos de ensaio para os corpos de prova revestidos com nitreto de cromo e 120 segundos para os corpos de prova revestidos com carbonitreto de titânio.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, conclui-se que o carbonitreto de titânio foi o revestimento superficial que possibilitou a menor perda volumétrica dentre os três analisados. Percentualmente as perdas proporcionadas por este revestimento foram de 16,48% e 51,14% menores quando comparadas com as perdas do nitreto de cromo e nitreto de titânio, respectivamente. Na comparação entre o nitreto de cromo e o nitreto de titânio, o primeiro apresentou uma perda volumétrica 29,76% menor que o segundo.

O desempenho superior apresentado pelo carbonitreto de titânio, assim como no ensaio de desgaste pino-sobre-disco, pode ser explicado pela excelente combinação de alta dureza e baixo coeficiente de atrito proporcionada por este revestimento. Este resultado confirma os resultados encontrados por Zeghni e Hashmi;^[9] Suski^[10] e Bressan, Hesse e Silva Jr.^[1] Estes autores, analisando diferentes revestimentos superficiais aplicados em diversos tipos de aços ferramenta, mostraram que quanto maior a dureza do revestimento superficial, maior a resistência ao desgaste abrasivo.

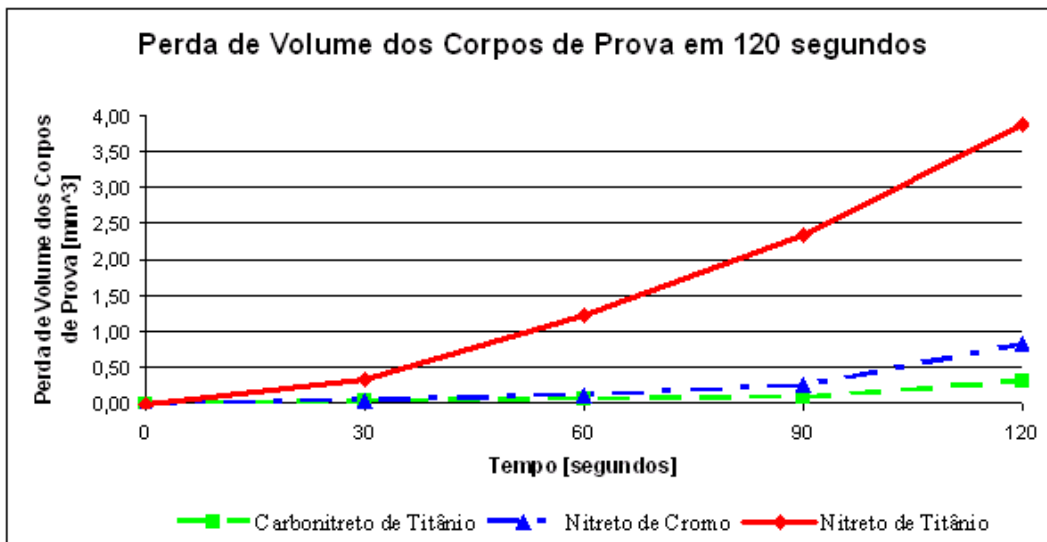


Figura 8: Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova em 120 segundos de ensaio.

4 CONCLUSÕES

Analisando os resultados experimentais obtidos, algumas conclusões podem ser apresentadas com relação aos ensaios e à resistência ao desgaste dos revestimentos superficiais estudados.

Os ensaios de desgaste permitem avaliar e classificar o comportamento tribológico de diversos materiais, possibilitando a otimização do processo de seleção ou de desenvolvimento dos mesmos para uma determinada aplicação.

Os valores experimentais de microdureza mostram a importância da utilização dos revestimentos superficiais para a obtenção de elevados valores de dureza superficial. Entretanto, esta propriedade mecânica não é a única responsável pelo bom desempenho de um filme tribológico. Os resultados obtidos com o nitreto de cromo comprovam esta afirmação. A excelente adesividade ao substrato torna este revestimento uma boa opção para operações de conformação com baixa abrasividade.

O nitreto de titânio, revestimento superficial mais difundido e atualmente utilizado nas indústrias, apresentou o pior desempenho dentre os três analisados, tanto no ensaio de desgaste pino-sobre-disco quanto no disco de borracha-areia abrasiva.

O carbonitreto de titânio apresentou as menores perdas volumétricas tanto no ensaio de desgaste pino-sobre-disco quanto no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva. Estes resultados comprovam que a combinação de elevada dureza e baixo coeficiente de atrito tornam este revestimento superficial a melhor opção, dentre os três revestimentos analisados, para componentes submetidos a severo desgaste abrasivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CISER Parafusos e Porcas, à Sociedade Superior de Ensino de Santa Catarina e à Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 BRESSAN, J. D.; HESSE, R.; SILVA JR., E. M. Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN e TiCN. **Wear**, [S.l.], v. 250, p. 561-568, 2001.
- 2 PINEDO, C. E. Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v. 60, n. 543, p. 162, 2004.
- 3 SINATORA, A.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Propriedade de superfície de filmes e camadas. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v. 60, n. 543, p. 164-166, 2004.
- 4 DAL COMUNI, J. F.; FAGUNDES, T. A. **Estudo do desgaste dos revestimentos em pinos**. 2004. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Superior Tupy, Sociedade de Ensino Superior de Santa Catarina, Joinville.
- 5 VILLARES METALS. Catálogo técnico sobre aços ferramenta. São Paulo, 2003.
- 6 SAE J403. **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. Warrendale, 1995.
- 7 DUROTIN. BRASIMET: propriedades dos revestimentos superficiais. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/durotin/tipos.asp>>. Acesso em: 15 jul. 2004.
- 8 ASTM G 65. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Philadelphia, 1991.
- 9 E. ZEGHNI; M. S. J. HASHMI. Comparative wear characteristics of tin and tic coated and uncoated tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], n. 155-156, p. 1923-1926, 2004.
- 10 SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.