

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO RÁPIDO M2 FABRICADO POR METALURGIA DO PÓ E TRATADO POR DIFERENTES MÉTODOS DE NITRETAÇÃO¹

*Eliana Franco*²
*José Luiz Santos*³
*Josue Basen Pereira*³
*César Edil da Costa*⁴
*Julio Cesar Giubilei Milan*⁴

Resumo

O aço rápido é a principal classe de aços utilizados em ferramentas de usinagem. Isso se deve a sua elevada dureza e principalmente a capacidade de trabalhar em certas condições que elevam excessivamente a temperatura da ferramenta. A nitretação é um tratamento de superfície muito utilizado para aumento da vida das ferramentas de corte devido a vantagens como baixo custo. Em Condições severas de usinagem, o metal duro revestido não se aplica, visto que possui baixa tenacidade e resistência a flexão, nesses casos as ferramentas de aço rápido são mais adequadas. Neste trabalho, tratamentos termoquímicos de nitretação gasosa, a plasma e sólida foram aplicados no aço ferramenta M2 fabricado por metalurgia do pó, temperado e revenido com o objetivo de comparar o desempenho tribológico nos três processos e avaliar a eficiência da nitretação sólida. Foi observado que a nitretação a plasma conferiu os melhores resultados, uma boa resistência ao desgaste e microdureza superficial. As condições de nitretação gasosa utilizadas neste trabalho fragilizaram o material. As amostras com nitretação sólida apresentaram maior volume de desgaste que as amostras sem tratamento de nitretação.

Palavras-chave: Aço rápido; Metalurgia do Pó; Nitretação; Desgaste.

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF M2 HIGH SPEED STEEL PRODUCED BY POWDER METALLURGY AND TREATED BY DIFFERENT METHODS OF NITRIDING

Abstract

High Speed Steel is the main steel class used in machine tools. This is due to its high hardness and especially the ability to work under certain conditions that raise the temperature too much of the tool. Nitriding is a surface treatment widely used to increase the life of cutting tools due to advantages such as low cost. In harsh conditions of machining, coated hard metal does not apply, since it has low toughness and bending resistance, in such cases high speed steel tools are most appropriate. In this work, gas, plasma and solid nitriding thermochemical treatments have been applied in M2 tool steel produced by powder metallurgy, quenched and tempered in order to compare the tribological performance in all three cases and evaluate the efficiency of solid nitriding. It was observed that the plasma nitriding provided the best results, a good wear resistance and microhardness. The gas nitriding conditions used in this paper weakened the material. The samples with solid nitriding presented higher wear volume than the sample without nitriding treatment.

Key words: High speed steel; Powder metallurgy; Nitriding; Wear.

¹ *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Aluna de doutorado da Universidade do Estado de Santa Catarina.*

³ *Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina.*

⁴ *Doutor em Engenharia Mecânica e Professor da Universidade do Estado de Santa Catarina.*



1 INTRODUÇÃO

Os aços rápidos são assim designados, pois no início do século XIX, quando do seu desenvolvimento, eram os materiais que suportavam as maiores velocidades de corte. Atualmente, é a principal classe de aços utilizados em ferramentas de usinagem, tais como machos, brocas, alargadores, fresas. Isso se deve a sua elevada dureza no estado temperado e revenido e principalmente pela capacidade de trabalhar em certas condições que elevam excessivamente a temperatura da ferramenta. A eficiência de uma ferramenta de aço rápido não se altera mesmo quando a temperatura do gume atinge 550° C por efeito do atrito.⁽¹⁾

Muitos estudos têm sido realizados em torno da busca do aumento da vida das ferramentas de corte. Os últimos avanços tecnológicos permitiram a larga aplicação de revestimentos em ferramentas de metal duro. Porém em condições especiais de usinagem, onde se empregam materiais de difícil usinabilidade e furação profunda com corte interrompido, as brocas de metal duro revestidas mostram-se não ser as mais adequadas devido a sua baixa tenacidade e resistência a flexão.⁽²⁾

Apesar de a nitretação ser um processo utilizado em aços rápidos há quatro décadas, ela continua em evidência e vem aumentando sua participação com relação a outros processos de tratamento de superfície devido a vantagens como baixo custo e produção de uma camada aderente e contínua com a matriz.⁽³⁾

Embora a temperaturas adequadas, todos os aços são capazes de formar nitretos de ferro na presença de nitrogênio nascente, os resultados são mais favoráveis àqueles com elementos de liga benéficos à nitretação (alumínio, cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio) segundo o Metals Handbook⁽⁴⁾ como é o caso do aço rápido M2.

Muitos estudos têm sido feitos para avaliação do desempenho em usinagem do M2 nitretado. Silva, Binder e Teixeira⁽⁵⁾ avaliaram o desgaste do M2 nitretado a plasma a baixa temperatura em furações. O tratamento de nitretação a plasma mostrou uma eficiência significativa em brocas de 2 mm de diâmetro. As condições de tratamento utilizadas por esses autores foram pressão de 4 torr e atmosfera de 5% N₂ + 95% H₂. Para a broca de 2 mm, tempos de 15 min e 20 min na temperatura de 450°C resultaram em ganhos médios superiores a 2.100%.

Fedevjcyk⁽²⁾ estudou a nitretação gasosa de M2 em furações de corte interrompido no ferro fundido nodular. As brocas de aço rápido M2 nitretadas apresentaram menor desgaste em relação às brocas sem nitretação e de metal duro, o desgaste de flanco das brocas nitretadas foi 18% menor. O desgaste no M2 nitretado foi estável e uniforme, já as brocas de metal duro apresentaram um comportamento de desgaste instável devido a sua maior fragilidade. O processo de nitretação gasosa formou uma camada óxida na superfície das brocas que foi responsável por uma rugosidade menor.

Alvez⁽⁶⁾ avaliou o desempenho de fresas em M2 nitretadas a plasma no processo de fresamento variando-se a forma de uso do fluido de corte. Observou-se um desempenho superior nas fresas nitretadas a plasma comparadas às de referência. Também se observou que na nitretação a plasma é possível obter boa reprodutibilidade e adequado controle.

A nitretação sólida foi estudada por Almeida⁽⁷⁾ em aços ferramentas AISI H13, AISI P20 e N-8550. A nitretação sólida obteve os melhores resultados de desgaste, e microdureza compatível a obtida por nitretação gasosa e a plasma. A nitretação sólida proporcionou a formação de uma camada superficial (camada branca e zona de difusão) nos três aços estudados. A maior desvantagem do processo de

nitretação sólida foi a irregularidade da espessura da camada formada. O coeficiente de atrito não apresentou diferenças significativas, permanecendo constante em quase todas as situações.

Adicionalmente, a nitretação forma uma barreira a descarbonetação, e maiores temperaturas de nitretação estabilizam a camada nitretada.⁽⁸⁾

A microestrutura prévia a nitretação influencia na camada nitretada, através de difração de raios x foi observado que matrizes originalmente ferríticas levam a uma camada nitretada composta por fases ϵ -Fe₂-3N e γ' -Fe₄N + uma zona de difusão e matrizes originalmente martensíticas levam a uma camada constituída principalmente por uma zona de difusão. A profundidade nitretada também foi estimada usando perfis transversal de microdureza, medindo cerca de 140 μ m para as amostras totalmente recozidas e ~ 70 μ m para as temperadas e revenidas. A profundidade menor de nitretação observada na matriz martensítica foi interpretada com base nas tensões residuais compressivas existentes e permanência do carbono e elementos de liga no reticulado bct- α , que, assim, diminuem o coeficiente de difusão do nitrogênio pelo aprisionamento de átomos de nitrogênio e formação de precipitados finos de nitreto. Também foi observado que amostras originalmente ferríticas apresentaram após nitretação a plasma uma rugosidade duas vezes maior que a de amostras martensíticas.⁽⁹⁾

Outro fator importante a considerar no tratamento de nitretação é o acabamento superficial, foi observado que ferramentas submetidas a jateamento antes de uma nitretação a plasma apresentou uma maior vida quando comparada a ferramenta somente polida antes da nitretação. Na usinagem a integridade da aresta cortante e as condições de superfície são de grande importância. A considerável melhoria na vida da ferramenta com o jateamento foi atribuída à eliminação de sobreposições no material overlapping (plasticamente deformado) das arestas de corte e a introdução de tensões residuais de compressão antes da nitretação, que também permanecem após nitretação a plasma. Também foi observado que a formação de uma camada de compostos na ferramenta (quando nitretada com uma mistura com 76% vol. de N₂) resultou em uma redução da força de avanço e torque, o que foi atribuído ao baixo coeficiente de atrito das fases de nitreto. Nas ferramentas em que a camada nitretada era constituída apenas pela zona de difusão (5% vol. de N₂) foram encontradas as menores taxas de desgaste, isso é explicado pela fragilidade da zona de difusão de ferramentas nitretadas com uma mistura de gás de 76% vol. N₂, a qual leva formação de uma rede de cementita em contornos de grão.⁽¹⁰⁾

A nitretação gasosa é uma alternativa para modificar a camada superficial do material, formando uma camada composta integral e sem descontinuidades. Algumas aplicações em diferentes aços resultam num aumento da dureza de até 4 vezes utilizando a implantação de nitrogênio, carbono ou boro. Com a utilização de parâmetros especiais na nitretação sob baixa pressão do M₂ é possível obter camadas superficiais nitretadas isentas de poros e nitretos frágeis. Essas características são responsáveis pela formação de uma microestrutura otimizada e uma distribuição de microdureza favorável para a aplicação em ferramentas de corte, onde a resistência ao desgaste é um fator determinante.⁽²⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado para execução dos experimentos foi o aço rápido M2. As amostras foram fabricadas por metalurgia do pó, com dimensões após compactação de 25 mm de diâmetro e aproximadamente 4 mm de espessura. A carga de compactação foi de 560 MPa.

Após compactação, as amostras foram sinterizadas por 1 h a temperatura de 1.270°C em uma atmosfera de N₂ e 8% H₂.

Na sequência, as amostras foram submetidas ao tratamento de têmpera e revenido duplo. O tratamento de têmpera e revenido foram realizados conforme o ciclo esquematizado na Figura 1. O material foi aquecido até a temperatura de 800°C a uma taxa de 10°C/min e mantido por 10 min, a seguir foi aquecido a 10°C/min até 1.200°C e mantido por 3 min e finalmente foi resfriado em óleo a 80°C. A temperatura de 800°C é a temperatura de austenitização e 1.200°C é a temperatura de dissolução de carbonetos. O 1º revenido foi realizado logo após o tratamento de têmpera, o material foi aquecido a 10°C/min até 560°C e mantido por 2h, o 2º revenido foi realizado da mesma maneira que o 1º.

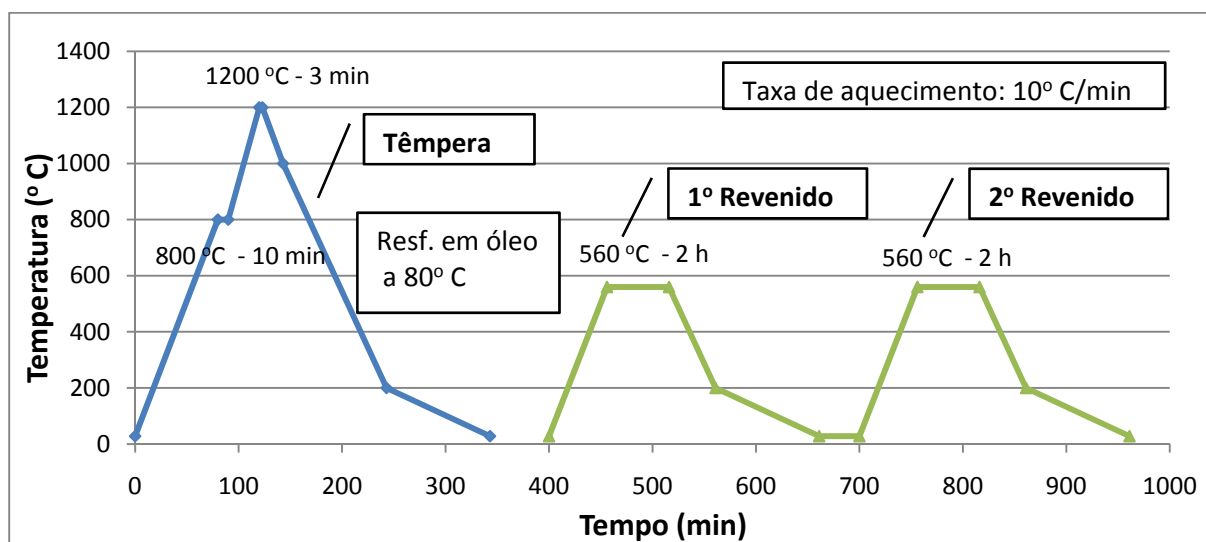


Figura 1. Esquema do tratamento térmico de têmpera e revenido.

Após têmpera e revenido as amostras foram nitretadas por três métodos distintos: nitretação gasosa, a plasma e sólida.

2.1 Tratamentos de Nitretação

A nitretação gasosa foi realizada na Empresa Brasimet através do processo denominado Deganit. A atmosfera utilizada foi de 50% NH₃, 50% N₂, e CO₂ em pequena quantidade. A temperatura de nitretação foi 560°C por 10 h.

A nitretação a plasma foi realizada no laboratório de Plasma e Tratamento de Superfícies do Departamento de Física da UDESC. Foi realizada em uma atmosfera de 20% N₂ e 80% H₂, a 560°C por 3 h.

A nitretação sólida foi realizada no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC. Este tipo de nitretação utiliza um granulado sólido denominado pelo fabricante de Turbonit k-20[®]. Neste método as amostras são imersas neste granulado em um recipiente vedado para garantir o

máximo de isolamento. Este método de nitretação foi chamado de sólida, embora, na realidade, o processo ocorra através de nitretação gasosa. Durante o aquecimento o granulado gera nitrogênio atômico que entra em contato com a superfície da amostra possibilitando a introdução deste elemento na superfície. A nitretação sólida foi realizada a 560°C por 3 h. Antes dos tratamentos de nitretação as amostras foram retificadas, lixadas e polidas.

2.2 Ensaio de Desgaste e Microdureza

As amostras foram caracterizadas através de medidas de densidade, ensaios de desgaste e microdureza.

Foram feitas medidas de densidade a verde e densidade do sinterizado. As medidas de densidade a verde foram feitas geometricamente e as do sinterizado através do método de Arquimedes.

Para avaliar os efeitos dos diferentes tipos de nitretação sobre as propriedades tribológicas, as amostras foram submetidas ao ensaio de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco sem lubrificação, de acordo com a norma ASTM G99/95.⁽¹¹⁾ Os contra-corpos utilizados foram esferas de alumina polida com 6,0 mm de diâmetro. Os testes foram realizados à temperatura ambiente, com umidade relativa mantida em cerca de 50% ou inferior. A carga aplicada sobre o pino foi de 10 N, a velocidade de deslizamento foi de 0,1 m/s e a distância de deslizamento de 1.000 m. Após ensaio de desgaste foram obtidos os perfis da trilha de desgaste através de um Perfilômetro CV - 2000 Contrace Mitutoyo, a partir do perfil e de uma rotina computacional foram calculados os volumes de desgaste. Os valores de coeficientes de atrito foram fornecidos pelo tribômetro. Foram realizadas três repetições de cada tipo de nitretação (sem tratamento de nitretação, gasosa, a plasma e sólida).

Para avaliar a microdureza foram feitas medidas de microdureza 0,025 HV na superfície nitretada e ao longo da seção transversal das amostras. Na superfície das amostras foram feitas seis medidas em cada tipo de nitretação. Para obtenção do perfil de durezas ao longo da seção, foram feitas medidas em 10 pontos; no centro das amostras foram feitas medidas em quatro pontos para método de nitretação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as densidades a verde e sinterizada. A Figura 2 apresenta micrografias ópticas do M2 com nitretação gasosa (a), a plasma (b) e sólida (c).

Tabela 1. Média (de 4 amostras) das densidades a verde e sinterizada e das variações volumétricas.

A verde		Variação Volumétrica (%)	Sinterizada	
ρ (g/cm ³)	ρ_{rel} (%)		ρ (g/cm ³)	ρ_{rel} (%)
6,254 ± 0,036	73,15 ± 0,43	3,7 ± 3,6	6,90 ± 0,13	80,7 ± 1,5

A Tabela 1 mostra a eficiência da sinterização. A variação volumétrica da amostra foi 3,7%. A densidade relativa da amostra passou de 73,15% para 80,7% após sinterização.

Na Figura 2 podem ser observadas as micrografias do M2 nitretado. Observa-se na Figura 2 (a) a seção da amostra com nitretação gasosa, a região mais clara próxima a borda pode ser a camada de difusão. Na Figura 2(b), a região marrom próxima a borda apresenta largura constante ao longo da borda, essa região pode ser a camada de difusão que se formou de maneira homogênea na nitretação a plasma. Na Figura 2(c) observa-se uma região marrom escura não homogênea próxima a borda, essa região pode ser a camada de difusão formada pela nitretação sólida.

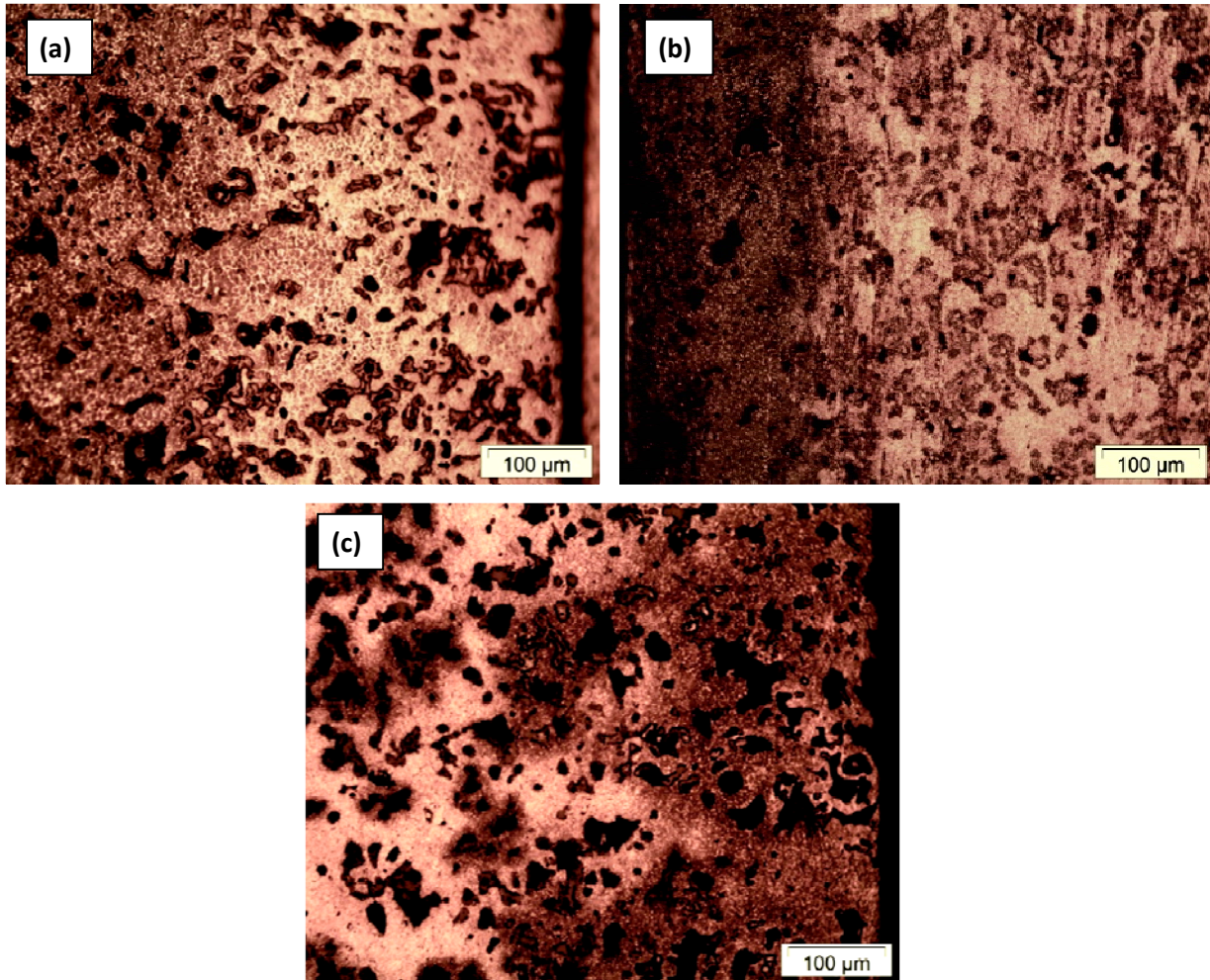


Figura 2. Micrografias ópticas do M2 com nitretação gasosa (a), a plasma (b) e sólida (c). Ataque: Nital 3%.

A Figura 3 mostra uma das amostras de M2 com nitretação gasosa que caiu acidentalmente e quebrou. A nitretação gasosa pode ter causado a fragilização do M2 tendo em vista que este método apresenta baixo fluxo de gases e baixo potencial de nitretação e por isso é necessário muito tempo de exposição à temperatura de nitretação. Como o M2 apresenta vários elementos de liga ele responde muito rápido a nitretação, um método com maior fluxo de gases, maior potencial de nitretação e mais rápido seria mais adequado a esse material.



Figura 3. Amostra de M2 com nitretação gasosa quebrada.

A Figura 4 mostra um perfil de trilha de desgaste das amostras sem tratamento superficial, os perfis das amostras nitretadas são similares a esse. A inclinação da linha de dados (linha vermelha) se deve ao fato da amostra estar apoiada em uma região com inclinação. Através de perfis de desgaste pode-se determinar a área da seção de desgaste e calcular o volume de material removido. A profundidade das trilhas de desgaste foi medida, para as amostras sem tratamento o valor foi de 5 μm , para a nitretação gasosa não foi possível visualizar, para a nitretação a plasma foi de 4 μm e para a nitretação sólida foi de 7 μm .

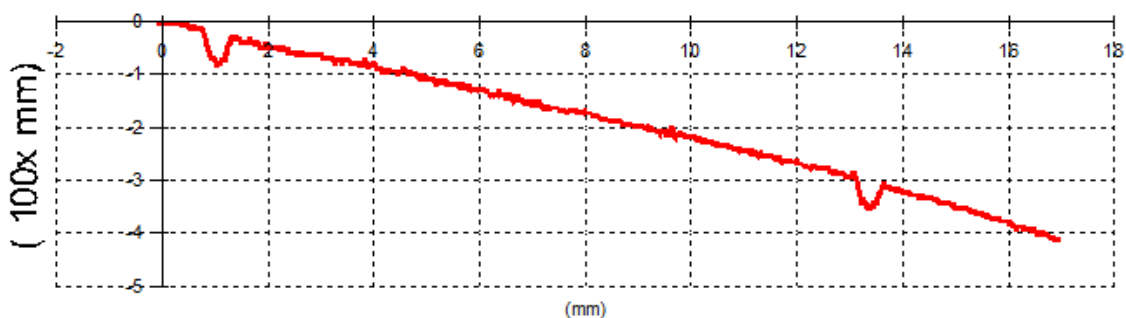


Figura 4. Perfil com profundidade de trilha da amostra M2 sem tratamento de nitretação, obtido por perfilometria.

Os volumes de desgaste e os coeficientes de atrito obtidos nos ensaio de desgaste são os apresentados na Tabela 2. As Figuras 5 e 6 apresentam gráficos dos volumes de desgaste e coeficientes de atrito respectivamente, em comparação com os valores obtidos por Pereira et al.⁽¹²⁾ em amostras de M2 nitretadas sem tratamento prévio de têmpera.

Tabela 2. Volume de desgaste e coeficiente de atrito médios por método de nitretação

	Volume de Desgaste (mm³)	Coefficiente de Atrito
Sem Tratamento	0,0717 ± 0,0094	0,682 ± 0,043
Plasma	0,0513 ± 0,0064	0,664 ± 0,060
Sólida	0,107 ± 0,011	0,683 ± 0,019
Gasosa	Não mensurável	0,188 ± 0,040

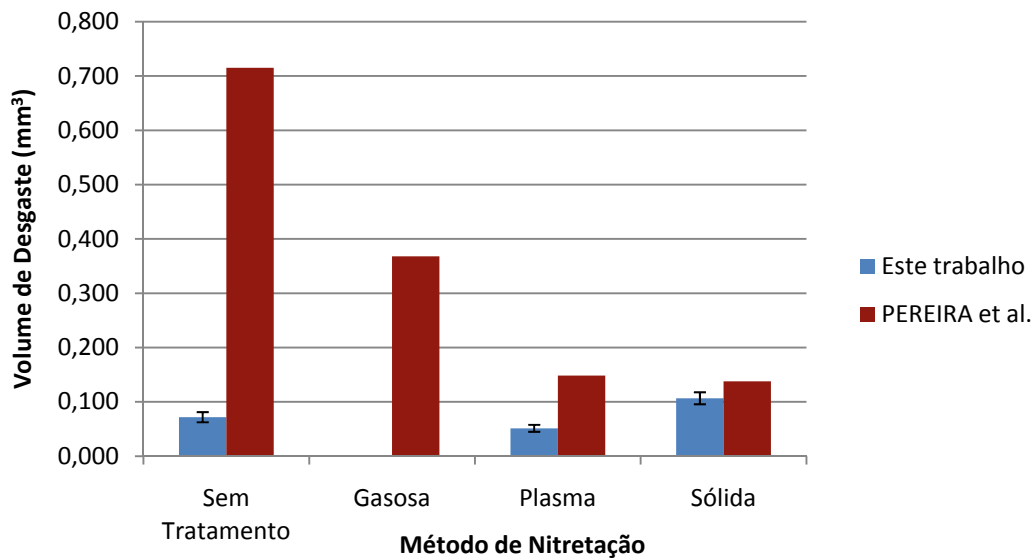


Figura 5. Volume de desgaste médio por método de nitretação.

Observa-se que, a resistência ao desgaste, representada pelo volume de desgaste, das amostras deste trabalho foi bem superior a resistência ao desgaste do trabalho de Pereira et al.⁽¹²⁾ (Figura 5), isso era esperado, já que as amostras deste trabalho foram temperadas e revenidas previamente aos tratamentos de nitretação.

O volume de desgaste da amostra com nitretação gasosa não foi medido, não foi possível identificar a trilha de desgaste por perfilometria, ou seja, a profundidade da trilha foi menor que a resolução do equipamento. Acredita-se que a nitretação gasosa foi o método mais eficiente para prevenir o desgaste, visto que não foi possível quantificar o desgaste devido ao baixo volume de material removido. Os valores de volume de desgaste para as demais amostras foram muito próximos (Figura 5), por isso, para analisar esses resultados aplicou-se o teste t de Student. Através do teste t, pode-se concluir com 87% de certeza que as amostras com nitretação a plasma apresentaram menor volume de desgaste que as amostras sem nitretação; e com 92% de certeza que as amostras com nitretação sólida apresentaram maior volume de desgaste que as amostras sem nitretação. Os valores de volume de desgaste de todos os tipos de nitretação foram baixos, menores que aproximadamente de $0,1 \text{ mm}^3$, mostrando a contribuição da têmpera sobre a resistência ao desgaste.

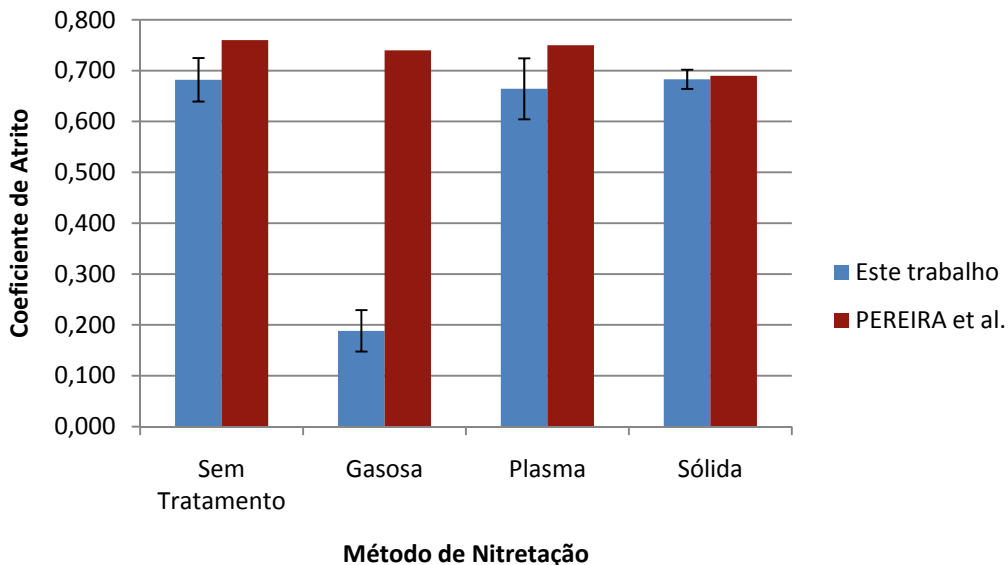


Figura 6. Coeficiente médio de atrito por método de nitretação.

Observa-se que os valores médios de coeficiente de atrito foram relativamente próximos aos encontrados por Pereira et al.,⁽¹²⁾ sobressaindo-se os coeficientes de atrito para a amostra com nitretação gasosa deste trabalho, com um valor de aproximadamente 0,2, bem inferior aos demais. Através da aplicação do teste t, pode-se afirmar com 99% de certeza que o coeficiente de atrito das amostras com nitretação gasosa é inferior aos demais. Vale lembrar que a nitretação gasosa empregada neste trabalho pode ter fragilizado as amostras.

Os coeficientes de atrito das amostras sem tratamento, com tratamento de nitretação a plasma e sólida apresentaram desvios-padrão muito altos, por isso, de acordo com o teste t, não se pode afirmar se houve diferença entre estes valores. As medidas de microdureza feitas nas superfícies das amostras são apresentadas na Figura 7.

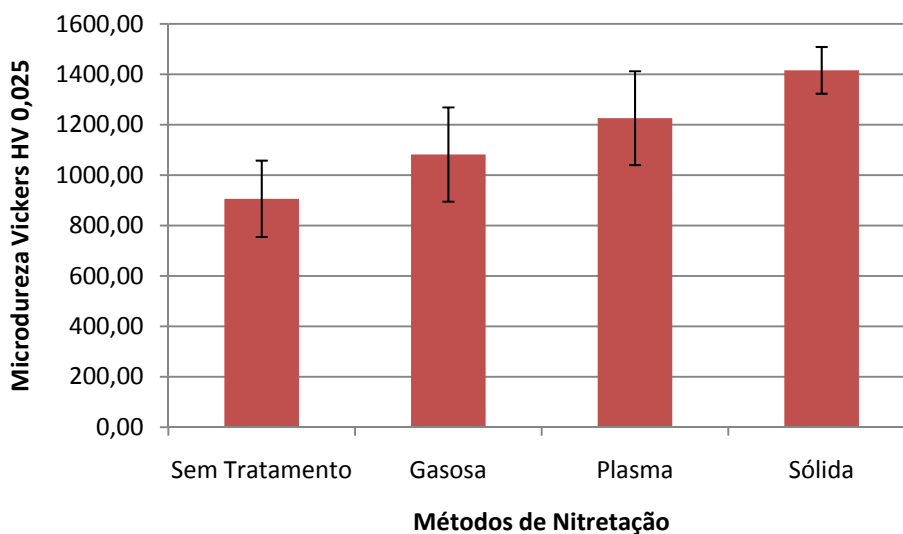


Figura 7. Microdureza média superficial por método de nitretação.

Através do teste t pode-se afirmar com 75% ou mais de certeza que a microdureza superficial das amostras é crescente na seguinte ordem: amostras sem tratamento, com nitretação gasosa, com nitretação a plasma e com nitretação sólida.

Observou-se também na Figura 7, um aumento significativo nas microdurezas com a aplicação das nitretações. A aplicação das nitretações a plasma e sólida conferiu às amostras valores de 1.200 HV e 1.400 HV respectivamente, destacando-as das amostras sem tratamento, com microdureza de 900 HV (Figura 7).

O perfil de microdurezas medido na seção transversal é apresentado na Figura 8.

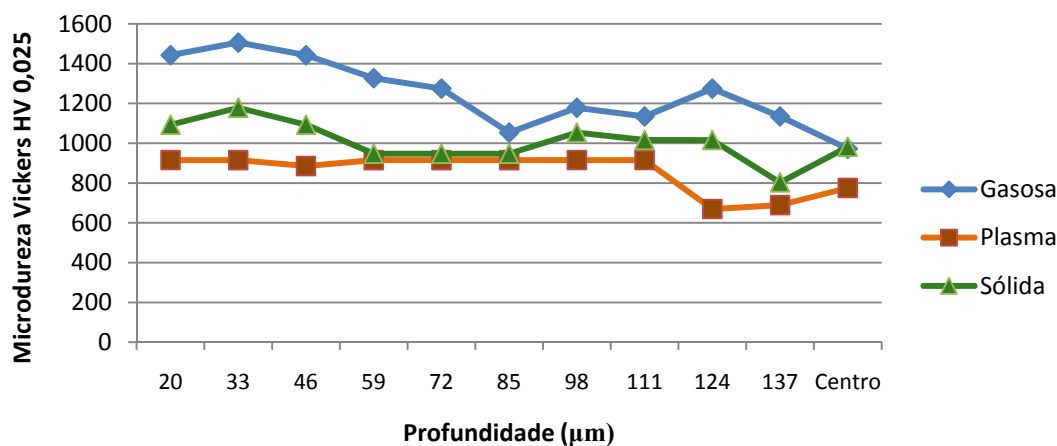


Figura 8. Perfil de microdurezas na seção transversal de amostras nitretadas pelos três diferentes processos.

Observa-se que as amostras nitretadas em ordem crescente de microdurezas superficial foram: Gasosa, Plasma e Sólida (Figura 7); e em ordem crescente de microdurezas ao longo da seção transversal foram: Plasma, Sólida e Gasosa (Figura 8). As ordens das amostras nas medidas de microdureza superficial e transversal não foram iguais porque se tratam de medidas diferentes, a superficial leva em consideração a camada superficial de nitretação, enquanto a transversal caracteriza as camadas de difusão. A inversão de ordem das amostras nas medidas de microdureza superficial e transversal também foi observada em outro trabalho.⁽¹³⁾ Amostras de H13 foram nitretadas a plasma com 5% de H₂ em tempos diferentes. Observou-se que a microdureza superficial era maior para o tempo de 3 h do que para 6 horas, mas quando o perfil de microdureza ao longo da seção foi obtido observou-se que o perfil para 6 h de nitretação apresenta microdurezas maiores que o perfil para 3 h de tratamento.⁽¹³⁾

Na Figura 8 observa-se que microdureza aumentou do centro para a superfície das amostras, como era esperado em amostras nitretadas. Na amostra com nitretação gasosa a microdureza aumentou de 1.000 HV no centro para 1.400 HV a 20 µm da superfície nitretada; na amostra com nitretação sólida de 1.000 HV para 1.100 HV e na amostra com nitretação a plasma de 800 para 950 HV.

Não foi possível identificar com exatidão, através da medição de microdureza, o comprimento da camada nitretada, ou seja, a profundidade a partir da superfície em que a microdureza foi próxima a microdureza do centro da amostra. Observando-se a Figura 8, ela parece estar em torno de 85 µm para a amostra tratada com nitretação gasosa, em torno de 60 µm para nitretação sólida e em torno de 110 µm para nitretação a plasma.



Numa próxima etapa, está previsto o estudo dos mecanismos de desgaste atuantes, através de microscopia eletrônica de varredura, para tentar explicar a diferença dos resultados tribológicos entre as amostras nitretadas pelos 3 métodos.

CONCLUSÃO

- A nitretação a plasma conferiu o menor volume de desgaste. Embora, os valores de volume de desgaste de todos os tipos de nitretação foram baixos, menores que aproximadamente $0,1\text{mm}^3$.
- A amostra com nitretação sólida apresentou maior volume de desgaste que a amostra sem tratamento (com 92% de certeza conforme teste t).
- A nitretação gasosa proporcionou um coeficiente de atrito bem inferior as demais, aproximadamente 0,2 (com 99% de certeza conforme teste t).
- A nitretação gasosa empregada neste trabalho fragilizou o M2.
- A maior microdureza superficial é a obtida por nitretação sólida, seguida por nitretação a plasma.
- Houve um aumento significativo nas microdurezas com a aplicação das nitretações.
- As nitretações a plasma e sólida conferiram às amostras valores de microdureza superficial de 1200 e 1400 HV respectivamente, destacando-as das amostras sem tratamento, com microdureza de 900 HV.
- O perfil de microdurezas transversal com maiores valores encontrados foi para a amostra por nitretação gasosa, seguindo a sólida e por último a plasma.
- Na amostra com nitretação gasosa a microdureza aumentou de 1000 HV no centro para 1.400 HV a $20\ \mu\text{m}$ da superfície nitretada; na amostra com nitretação sólida de 1.000 HV para 1.100 HV e na amostra com nitretação a plasma de 800 HV para 950 HV.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESC pela bolsa de doutorado da acadêmica Eliana Franco, à UDESC pelas bolsas de iniciação científica PROBIC aos acadêmicos José Luiz Santos e Josue Basen Pereira e à indústria Brasimet pela realização dos tratamentos de nitretação gasosa.

REFERÊNCIAS

- 1 STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995., p. 78-98
- 2 FEDEVJCYK, J. V. Estudo da Furação em corte interrompido do ferro fundido nodular utilizando brocas helicoidais de M2 nitretadas. In: Seminário de Iniciação científica da UTFPR, 2009, Curitiba.
- 3 CARDOSO, P. A. da S. **Influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento no processo de nitretação em banho de sais no aço rápido AISI M-2**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, 1999, 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear), São Paulo, 1999.
- 4 METALS HANDBOOK, ASM Metals Handbook. ASTM International, v. 4, 1991.



- 5 SILVA, A. A.; BINDER, C.; TEIXEIRA, C. R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste de Brocas de Aço Ferramenta M2 Nitretadas por Plasma a Baixa Temperatura.** Disponível em: http://java.cimm.com.br/cimm/construtordepaginas/htm/3_20_63.m Acesso em: 10 fev. 2011.
- 6 ALVES, C. A. F. C. **Estudo da nitretração a plasma aplicada em ferramentas para fresamento.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2002.
- 7 ALMEIDA, E. A. dos S. **Nitretração sólida, plasma e gasosa em aços ferramenta: análise microestrutural e comportamento ao desgaste.** Joinville, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2009, 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de materiais, Joinville, 2009.
- 8 TIER, M. A. D. et. al. Estudo do perfil de carbono na camada nitretada do aço AISI M2. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.4, n.2, p. 6-11, out.-dez. 2007.
- 9 AKBARI, A. et. al. Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel. **Surface & Coatings Technology**, p. 4114–4120, 2010.
- 10 ROCHA, A. da S.; STROHAECKER, T.; HIRSCH, T. Effect of different surface states before plasma nitriding on properties and machining behavior of M2 high-speed steel. **Surface and Coatings Technology**, p.176–185, 2003.
- 11 American Society for Testing and Materials – ASTM, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, G 99–95. Philadelphia, 1996.
- 12 PEREIRA, J. B. et al. Efeito da nitretração no desgaste de aços rápidos M2. In: 19^o CEBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2010, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, 2010. P. 5965-5972.
- 13 FRANCO Jr., A. R. **Obtenção de revestimentos dúplex por nitretração a plasma e PVD-TiN em aços.** São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003, 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) – São Paulo, 2003.