
EFEITO DA NITRETAÇÃO GASOSA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS *FERRAMENTA* PARA TRABALHO A FRIO AISI D2 E D6

Jan Vatauvuk*

Adayr Bôrro Jr **

Waldemar A. Monteiro***

Egberto Gomes Franco****

Resumo

A nitretação tem sido aplicada como um importante processo no incremento da dureza superficial dos aços em geral. O presente trabalho estuda o efeito do processo de nitretação gasosa nas propriedades mecânicas dos *aços ferramenta* para trabalho a frio AISI D2 e AISI D6. A energia absorvida e os módulos de ruptura desses materiais foram estudados por meio do ensaio de impacto Charpy sem entalhe e ensaio de flexão 4-pontos.

Estudos do efeito da nitretação sobre resistência à fadiga e resistência ao desgaste têm sido amplamente abordados nas últimas décadas. A relação entre a nitretação e as propriedades mecânicas, tenacidade e módulo de ruptura dos aços ferramenta tem recebido pouca atenção da literatura.

* Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

** Universidade Presbiteriana Mackenzie. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Escola de Engenharia.

*** Faculdade de Comunicação e Informática da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

**** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Ipen – USP.

Os resultados do presente estudo mostram que a nitretação reduz as propriedades mecânicas para ambos os aços, o que é inferido pela redução da energia absorvida e módulos de ruptura.

Abstract

Nitriding has been being applied as an important process concerning surface hardening for steels in many applications. The AISI D2 and AISI D6 cold work tool steels have world wide tooling application, and will be the main concern in terms of mechanical properties gas nitriding effect. Unnotched Charpy as well as 4-point bending test were carried out to investigate energy absorbed and modulus of rupture before and after nitriding.

Tribological as well as fatigue properties effect related to the nitriding process have been the main concern for decades. By the other hand, studies related to nitriding and mechanical properties have been poorly investigated.

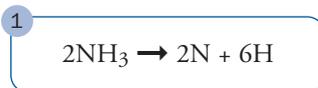
The results show a mechanical properties reduction effect due to the nitriding process, in terms of impact energy absorption as well as four point bending modulus of rupture.

1 INTRODUÇÃO

A nitretação é um processo termoquímico de ampla aplicação industrial, que vem recebendo uma atenção cada vez maior por parte dos fabricantes de ferramentas em face dos seus efeitos no aumento da dureza superficial, da redução do coeficiente de atrito, do aumento da resistência à corrosão etc.^{1, 2, 3} Outro fator que merece destaque diz respeito à temperatura relativamente baixa na qual se realiza esse processo, causando um mínimo de variação de volume nos componentes e ferramentas.⁴ Isso ocorre devido ao fato de o processo se efetivar no campo ferrítico dos aços.

Três processos de nitretação podem ser empregados na atualidade: a nitretação em banho de sal, a nitretação a gás e a nitretação a plasma; sendo os dois primeiros os mais usuais no Brasil.

A nitretação a gás, processo empregado no presente trabalho, utiliza como fonte de nitrogênio o gás amônia NH_3 , mediante o aquecimento das regiões a serem nitretadas, ocorrendo a dissociação do referido gás segundo a Equação (1):



Nas condições usuais de nitretação, observa-se na microestrutura do aço a formação de duas regiões distintas por meio do metal-base: a camada de difusão e a camada branca, ambas apresentadas na Figura 1:⁵

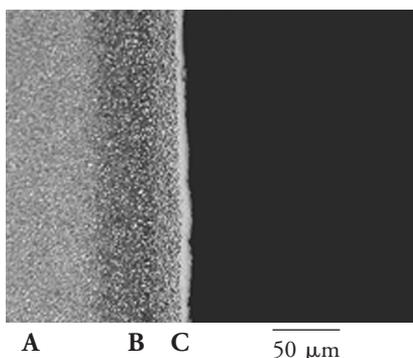


Figura 1 Estrutura típica obtida após nitretação gasosa. Observa-se metal-base (A), camada difusão (B) e camada branca (C). Aço ferramenta para trabalho a frio sinterizado, K 190. Ataque Nital 4%⁵

O efeito do processo de nitretação na resistência ao desgaste de aços ferramenta já é bastante conhecido, assim como o efeito sobre fenômenos de fadiga, no caso de solicitações de alto ciclo. Por outro lado, o efeito desse processo termoquímico na propriedade mecânica tenacidade não tem recebido a atenção necessária, existindo pouco ou nenhum material na literatura.

O presente trabalho estuda o efeito do processo de nitretação gasosa nas propriedades mecânicas dos aços ferramenta para trabalho a frio AISI D2 e AISI D6, aços largamente utilizados pelo mercado de ferramentas. As respostas desses materiais, antes e após a aplicação do referido processo de nitretação, foram estudadas por meio do ensaio de flexão 4-pontos e do ensaio de Charpy sem entalhe.

O ensaio de flexão 4-pontos é recomendado para aços ferramenta para trabalho a frio, uma vez que esses materiais apresentam dureza na faixa de 55HRC a 65HRC, inviabilizando, por exemplo, teste de tração.⁶

Embora o teste de Charpy com entalhe “V” seja aplicado para um grande número de famílias do aço-carbono, no caso dos aços ferramenta, o ensaio Charpy sem entalhe é recomendado, uma vez que os valores de energia absorvida são baixos, dificultando interpretações.⁶

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As barras recozidas de diâmetro 50,80mm dos aços AISI D2 e AISI D6, utilizados no presente trabalho, foram submetidas à composição química pelo método de via úmida.

Corpos de prova para ensaio de flexão 4-pontos e ensaio Charpy sem entalhe foram confeccionados utilizando-se máquinas mecânicas usuais como torno, fresa e retífica. As amostras para ensaio de flexão 4-pontos mediam 5mm de diâmetro, com 60mm de comprimento. Os corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy sem entalhe apresentaram geometria da seção transversal retangular de 7mm x 10mm e comprimento de 55mm. Foram preparados 15 corpos de prova para cada aço em questão.

Em seguida todos os corpos de prova foram submetidos a tratamentos de têmpera e revenimento, segundo parâmetros usuais da indústria, como ilustra a Tabela 1:

TABELA 1

Parâmetros utilizados no tratamento de têmpera e revenido das amostras AISI D2 e AISI D6

Aço	Austenitização (°C)	Revenido (°C)
AISI D2	1.000	580
AISI D6	960	580

Após essa etapa, corpos de prova foram submetidos à nitretação gasosa, seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 2. Cinco amostras para Charpy e cinco amostras para flexão 4-pontos foram separadas para posterior comparação dos resultados com aquelas nitretadas.

TABELA 2

Parâmetros utilizados no tratamento de nitretação gasosa para amostras AISI D2 e AISI D6

	Primeira etapa			Patamar	Segunda etapa			Patamar
	Fluxo (Nm ³)				Fluxo (Nm ³)			
AISI D2/D6	N ₂	NH ₃	CO ₂	2h a 570°C	N ₂	NH ₃	CO ₂	4h a 570°C
	4,5	4,5	0,6		4,5	4,5	0,3	

Vale ressaltar que os parâmetros utilizados nas Tabelas 1 e 2 foram baseados nos processos usuais do mercado de ferramentas.

As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em durômetro Shimadzu tipo H com carga de 0,050kg, para estrutura recozida, estrutura temperada, estrutura temperada e revenida e camada (perfil). A etapa de microscopia óptica envolveu a de preparação das amostras utilizando-se os seguintes equipamentos: “Cut-off”; embutidora; lixadeira e politriz. As observações foram realizadas em microscópio Olympus, modelo BX 60M, monitor Sony Trinitron PVM 1353MD, e fotos foram realizadas com máquina digital Nikon Coolpix 800 acoplada. A preparação das amostras com camada nitretada passou por técnicas especiais, como rotação de 10° em cada lixamento, em vez de 90° (procedimento normal), com objetivo de preservar a camada. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no microscópio Philips XL 30 do Ipen, USP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta a composição química dos aços AISI D2 e D6 utilizados no presente trabalho.

TABELA 3

Composição química dos aços AISI D2 e D6

Aço	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Co	Ni
AISI D2	1,49	0,27	0,31	0,024	0,001	12,3	0,94	0,95	0,01	0,02	0,17
AISI D6	2,12	0,32	0,36	0,028	0,013	11,53	–	0,21	0,96	–	–

As Figuras 2A e 2B apresentam o aspecto típico observado na microestrutura desenvolvida, após o processo de nitretação gasosa, para os aços AISI D2 e D6, respectivamente.

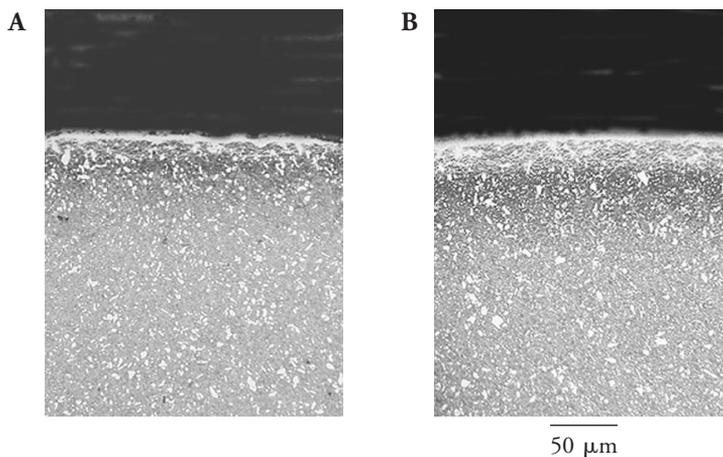


Figura 2 (A) Aspecto microestrutural da camada nitretada a gás do aço AISI D2. **(B)** Idem para o AISI D6. Ataque Nital a 4%

As medidas de microdureza realizadas nos aços D-2 e D-6 nitretados estão apresentadas na Figura 3.

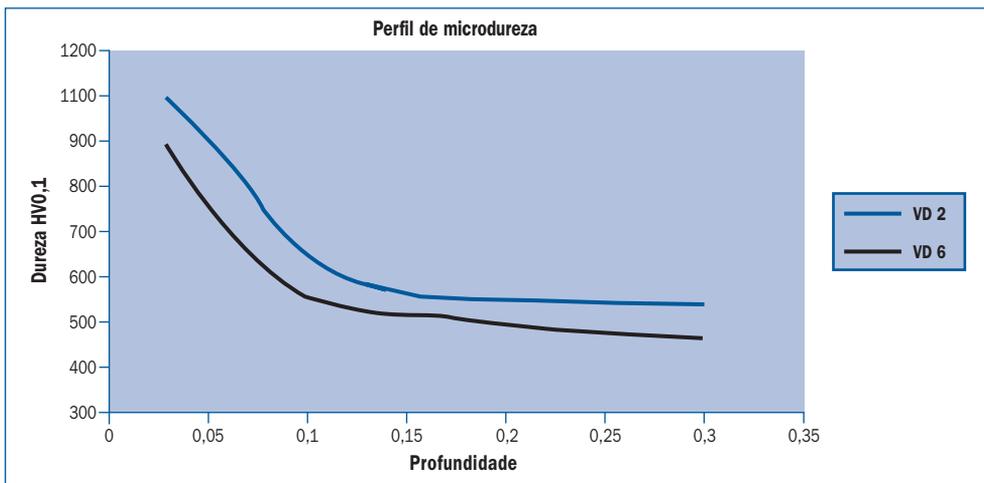


Figura 3 Curvas de microdureza para os aços AISI D2 e D6 nitretados. Média de cinco impressões por ponto

A profundidade das camadas nitretadas obtidas por meio da análise metalográfica das Figuras 2A e 2B para os aços D2 e D6 apresenta valores próximos, por volta de 100mm. Um comportamento semelhante para os dois aços no que diz respeito à profundidade da camada nitretada é também observado por meio dos perfis de microdureza mostrados na Figura 3. Um fato que chama a atenção é que a profundidade tratada nas medidas mecânicas é maior do que as obtidas em análise metalográfica, pelo menos quando o ataque utilizado para revelar a microestrutura é Nital.

As curvas de microdureza obtidas indicam uma melhor resposta para o aço D2 em relação ao D6, com valores sistematicamente superiores. Uma possível explicação para a melhor resposta da liga AISI D2 pode estar relacionada à presença do molibdênio, conforme pode ser visto na Tabela 3. Os resultados referentes aos ensaios de flexão 4-pontos e impacto para os aços nas condições temperado e revenido, com e sem a aplicação do processo de nitretação, podem ser vistos nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

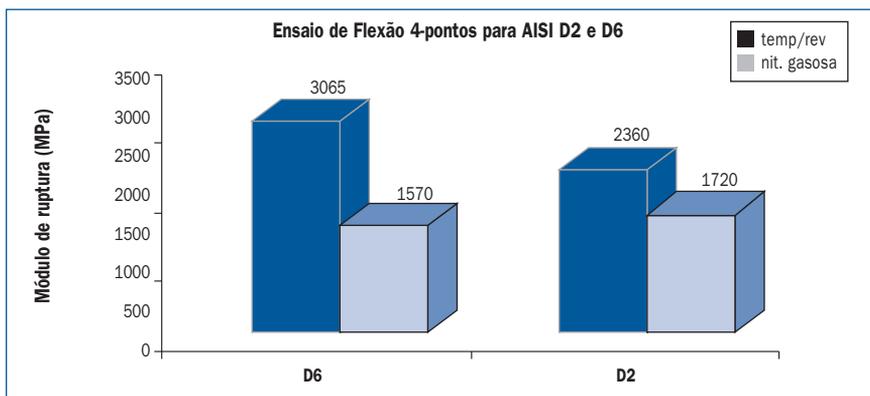


Figura 4 Valores de módulo de ruptura obtidos em ensaio de flexão 4-pontos para os aços D2 e D6 temperados e revenidos com e sem a aplicação do processo de nitretação

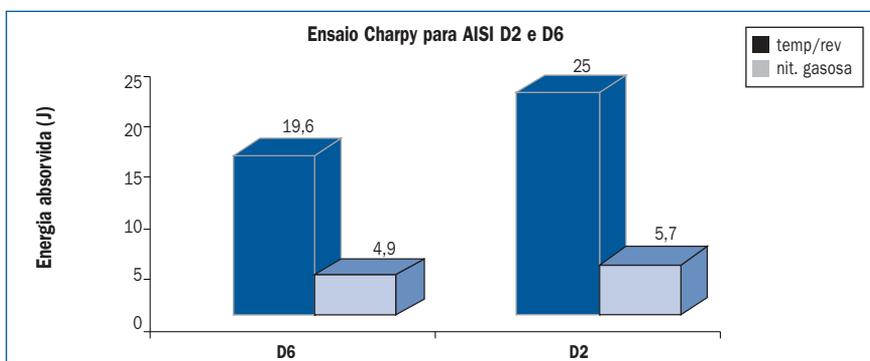


Figura 5 Valores de energia absorvida para os aços D2 e D6 temperados e revenidos com e sem a aplicação do processo de nitretação a gás

O exame das Figuras 4 e 5 indica que o tratamento de nitretação provoca uma redução das propriedades mecânicas tanto no ensaio de flexão 4-pontos, traduzido pelo módulo de ruptura, como no ensaio de impacto Charpy, inferido pela energia absorvida. Para os dois aços, o decréscimo das propriedades mecânicas, após a nitretação a gás, foi mais notado no ensaio de impacto (redução de cerca de quatro vezes) do que no ensaio de flexão 4-pontos.

Sabe-se com base em resultados indicados na literatura, que, de uma maneira geral, o processo de nitretação aumenta a resistência à fadiga de alto ciclo para os aços-carbono. A redução das propriedades mecânicas medidas pelos parâmetros módulo de ruptura e energia absorvida em ensaio de impacto Charpy vai em sentido oposto, sendo, portanto, uma indicação importante, não contemplada na literatura, a qual não apresenta valores mensurados.

A Figura 6 traz o aspecto das fraturas ocorridas no ensaio flexão de 4-pontos e Charpy para o AISI D2 submetido à têmpera e revenido (A), assim como temperado e revenido mais nitretação gasosa (B). As Figuras 7A e 7B, idem, porém para o AISI D6.

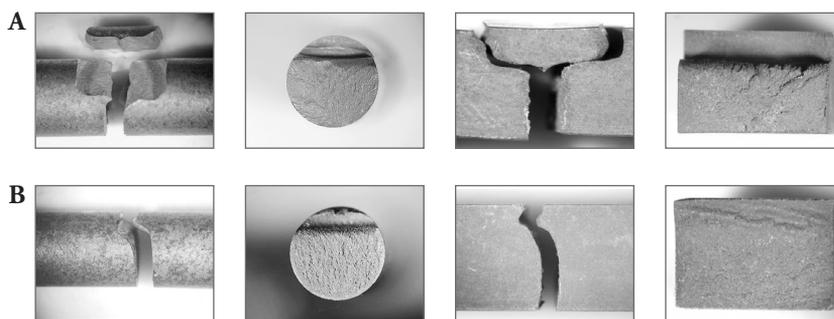


Figura 6 (A) AISI D2 temperado/revenido; **(B)** AISI D2 temperado/revenido e nitretado a gás

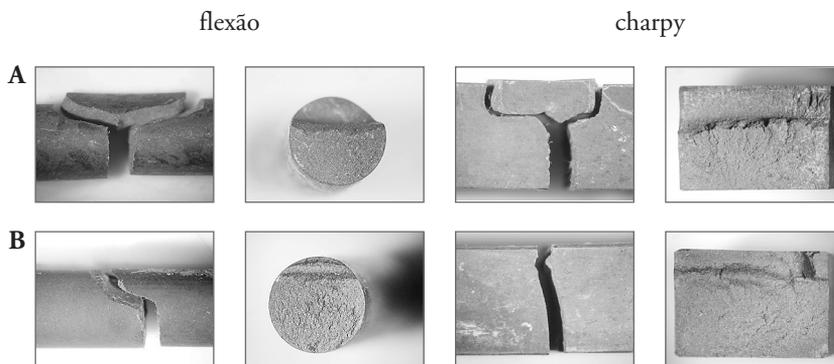


Figura 7 (A) AISI D6 temperado/revenido; **(B)** AISI D6 temperado/revenido e nitretado a gás

O exame das Figuras 6 e 7 indica que, na condição de temperado e revenido, os dois materiais se rompem em três partes, tanto no ensaio de impacto Charpy, quanto no ensaio de flexão 4-pontos, em função de uma ramificação da trinca na parte final de sua trajetória. Esse fato não é observado após a aplicação do processo de nitretação a gás, o que constitui a principal diferença observada nos modos de ruptura entre os materiais com e sem aplicação do processo de nitretação.

As superfícies de fratura observadas nas Figuras 6 e 7 indicam a presença de marcas radiais mais bem definidas para o aço AISI D2 em relação ao D6, o que pode estar relacionado com o menor teor de carbono do primeiro, o que se traduz por uma menor fração volumétrica de carbonetos.

As Figuras 8A e 8B apresentam as observações realizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), para as ligas AISI D2 e D6, respectivamente, submetidas à nitretação gasosa.

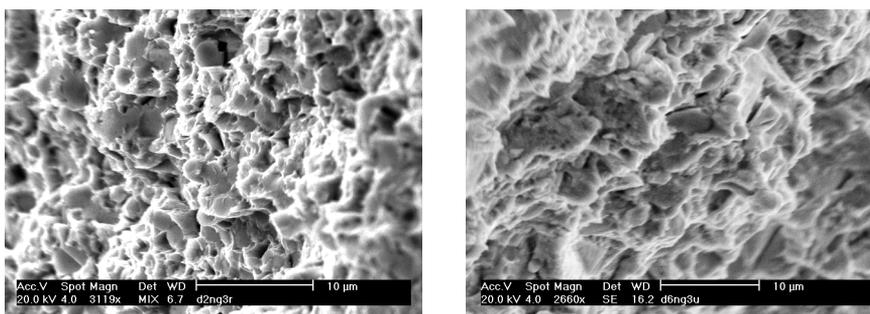


Figura 8 Mecanismo típico encontrado nas amostras nitretadas a gás. **(A)** Imagem de elétrons secundários para a liga D2. **(B)** Idem para a liga D6

Tanto os corpos de prova rompidos no ensaio de flexão como aqueles rompidos no ensaio de impacto apresentaram aspectos de fratura no microscópio eletrônico de varredura, conforme apresentados nas Figuras 8A e 8B. Pode-se inferir a complexidade do mecanismo de fratura em microestruturas compostas de grande fração volumétrica de partículas frágeis, carbonetos, em uma matriz martensítica revenida. Sabe-se que na martensita revenida, quando a fratura apresenta caráter transgranular, esta ocorre pelo mecanismo de quasi-clivagem. A interação da clivagem das partículas frágeis com o processo de fratura na martensita revenida gera um aspecto topográfico da face de fratura que se assemelha à quasi-clivagem, podendo-se eventualmente manter a denominação, com ressalvas.

4 CONCLUSÕES

O processo de nitretação gasosa reduz as propriedades mecânicas dos aços ferramenta para trabalho a frio AISI D2 e AISI D6, temperados e revenidos, tanto no ensaio de impacto, quanto no ensaio de flexão 4-pontos.

A liga AISI D2 apresentou melhor resposta ao processo de nitretação a gás em termos de incremento de dureza superficial.

A redução das propriedades mecânicas advindas do processo de nitretação gasosa foi mais acentuada no ensaio de impacto. Tanto o AISI D2 como o AISI D6 apresentaram redução de cerca de quatro vezes para os valores de energia absorvida.

A análise de fratura realizada para as amostras nitretadas a gás mostrou um complexo mecanismo de fratura, típico de estruturas com alta fração de partículas frágeis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HUTCHINGS, I. M. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. London: Edward Arnold, 1992.
2. EBNER, R.; LEITNER, H.; JEGELTSCH, F.; CALISKISNOGLU, D. Methods of property oriented tool steel design. In: *5th International Conference on Tooling*. Leoben, Austria, sep. 1999.
3. VATAVUK, J. Efeito da nitretação na resistência ao desgaste de anéis de óleo em motores ciclo Otto e ciclo diesel. In: *3^o Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste*. Fortaleza, 1994.
4. THELNING, K. E. *Steel and its heat treatment*. New York. McGraw-Hill, 1975.
5. BORRO, A. Jr. *Relatório de atividades*: Programa de Doutorado. Ipen-USP, CNPq, março de 2000.
6. JESPERSON, H. *Proceedings of the 5th International Conference on Tooling*. Leoben, Austria, 29th sep. to 1st oct. 1999, p. 93-102.