

## Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido

### Study of plasma nitriding and duplex treatment on high speed steel drills

Petteson Linniker Carvalho Serra<sup>1</sup>, João Rodrigues de Barros Neto<sup>2</sup>,  
André Sales Aguiar Furtado<sup>1</sup>, Wesley Rick Viana Sampaio<sup>3</sup>, Michelle Cequeira Feitor<sup>4</sup>  
Thercio Henrique de Carvalho Costa<sup>4</sup>, Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Piauí, Laboratório de Plasma – PPGCEM/UFPI, Teresina, PI, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia de Materiais – UFPI, Teresina, PI, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto Federal de Alagoas, Departamento de Mecânica – IFAL, Coruripe, AL, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica – UFPI, Teresina, PI, Brasil.

e-mail: plinniker@gmail.com, joaorbneto@gmail.com, salesandre7@gmail.com, wesley.sampaio@ifal.edu.br, michelle\_feitor@hotmail.com, thercioc@ct.ufrn.br, romulorms@gmail.com

#### RESUMO

A nitretação a plasma é realizada em ferramentas de aços rápidos para aumentar a resistência ao desgaste da aresta de corte e reduzir a tendência do material usinado em aderir na ferramenta. O objetivo do presente trabalho é estudar a viabilidade da nitretação a plasma e do tratamento duplex em brocas de aço rápido analisando o desgaste de brocas de aço rápido M2 submetidas a diferentes parâmetros de nitretação a plasma e deposição de filme de nitreto de titânio (TiN). As brocas passaram primeiro pelo tratamento de nitretação com, variando-se a temperatura em 350°C, 400°C, 450°C, 500°C e 550°C, enquanto o tratamento duplex foi dividido em nitretação convencional a 500 °C seguido de deposição de um filme fino de TiN aplicado pela técnica de deposição a plasma com gaiola catódica à temperatura de 400°C e 500 °C. As brocas nitretadas a 400°C ainda foram submetidas ao processo de deposição de um filme de TiN. Todas as brocas foram caracterizadas por microdureza Vickers e foram ensaiadas em centro de usinagem CNC, onde o corpo de prova era de aço AISI 4340. Foi realizada uma análise de desempenho entre os diferentes tratamentos, onde chegou à conclusão que o tratamento que resultou melhor desempenho na usinagem foi o tratamento de nitretação a 450°C. A camada nitretada das brocas foi analisada por perfil de microdureza, Microscopia Eletrônica de Varredura, porém observou-se que o valor de microdureza aumenta com o tempo de tratamento, e que a deposição do filme de TiN teve baixa relevância no desempenho da broca.

**Palavras-chave:** Nitretação a Plasma, Tratamento Duplex, Brocas de Aço Rápido.

#### ABSTRACT

The increase in tool life corroborates to the growth of productivity in manufacturing industries. In this context, the application of surface coatings is an alternative to increase the tool life of helical drills, especially those of small diameter. This paper studies the viability of plasma nitriding and duplex treatment on high speed steel drills. The studied nitriding treatments were performed at temperatures of 450 °C and 500 °C, while the duplex treatment was divided into conventional nitriding at 500 °C followed by the deposition of a TiN thin film applied by the cathodic cage plasma deposition technique at a temperature of 500 °C. The drills were characterized by Vickers Microhardness Test, Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) and Performance Simulation, where the flank wear on the cutting edge and the dimensional quality of holes machined in SAE 1045 steel specimens were measured. All treatments resulted in a higher surface hardness than that of untreated material. The tools subjected to nitriding and duplex treatment at 500 °C presented underperformance, not showing viability for application under these conditions. The nitrided drill at 450 °C showed a longer tool life than the untreated drill and produced all holes within the limits set by the 9H12 tolerance. The study showed that the application of plasma nitriding at a temperature of 450 °C contributed to increase the tool life of high speed steel drills and to improve the dimensional quali-

ty of the holes.

**Keywords:** Plasma Nitriding, Duplex Treatment, High Speed Steel drills.

## 1. INTRODUÇÃO

A otimização dos processos de usinagem contribui para o aumento da produtividade das empresas, essa otimização pode ser alcançada através de duas estratégias: redução dos tempos não-produtivos associado aos tempos passivos que envolvem atividade humana e redução dos tempos produtivos [1]. O desenvolvimento de tecnologias de melhoria das ferramentas de corte pode contribuir para a redução dos tempos não produtivos através da disponibilidade de ferramentas mais resistentes, que aumentam os intervalos entre trocas de ferramentas e na redução dos tempos produtivos com o desenvolvimento de ferramentas capazes de trabalhar com maiores velocidades de corte ou com um menor número de passes para a mesma operação de usinagem [1,2].

A utilização do metal duro representou um avanço na tecnologia de ferramentas de corte. Porém, as altas velocidades de corte exigidas por essas ferramentas limitam o seu uso em algumas operações, como na usinagem de furos de pequeno diâmetro, que exige grande rotação das máquinas para alcance das velocidades requeridas. Outra limitação na utilização do metal duro está relacionada às operações que requerem elevada tenacidade e resistência à flexão das ferramentas, como na furação profunda. Essas limitações justificam a grande utilização do Aço Rápido [3,4].

Uma alternativa para aumentar a dureza, a resistência ao desgaste e a vida útil das ferramentas de aço rápido, mantendo a elevada tenacidade do núcleo, consiste na aplicação de tratamentos superficiais [5]. Pode-se destacar o tratamento de nitretação a plasma, onde as propriedades da superfície são modificadas através da interação com o plasma. Esse processo é caracterizado pela elevada controlabilidade e reprodutibilidade, além de ser menos poluente, quando comparado às técnicas convencionais de tratamento de superfície [6–8].

Outra alternativa para melhorar as propriedades tribológicas das ferramentas é a aplicação de revestimentos de elevada dureza por deposição física de vapor - PVD. O processo de deposição associado a um tratamento preliminar de nitretação, é conhecido como tratamento duplex e é mais eficiente para aplicação em ferramentas [8]. A nitretação produz uma transição mais suave entre a dureza da superfície e a do substrato, contribuindo para uma melhor adesão do filme depositado [8,9]. Uma das técnicas de deposição de revestimentos é a utilização de gaiola catódica em um reator de nitretação a plasma convencional, trata-se de uma técnica por *sputtering* reativo em que os elementos que reagem com o plasma formando o revestimento são retirados da gaiola, o fato de utilizar praticamente o mesmo equipamento de nitretação é uma vantagem importante no que se refere a viabilidade econômica [10]. Um dos revestimentos mais utilizados é o nitreto de titânio TiN, que tem como características, elevada dureza, estabilidade térmica e resistência à abrasão [11].

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade do tratamento de nitretação a plasma com temperaturas de 350 °C, 400 °C, 450 °C e 500 °C e tratamento duplex com deposição de nitreto de titânio – TiN em brocas comerciais de aço rápido, com o diferencial de estudar o impacto desses tratamentos na qualidade dimensional dos furos usinados. Como parâmetros de comparação foram utilizadas uma broca de aço rápido sem tratamento e uma broca comercial revestida.

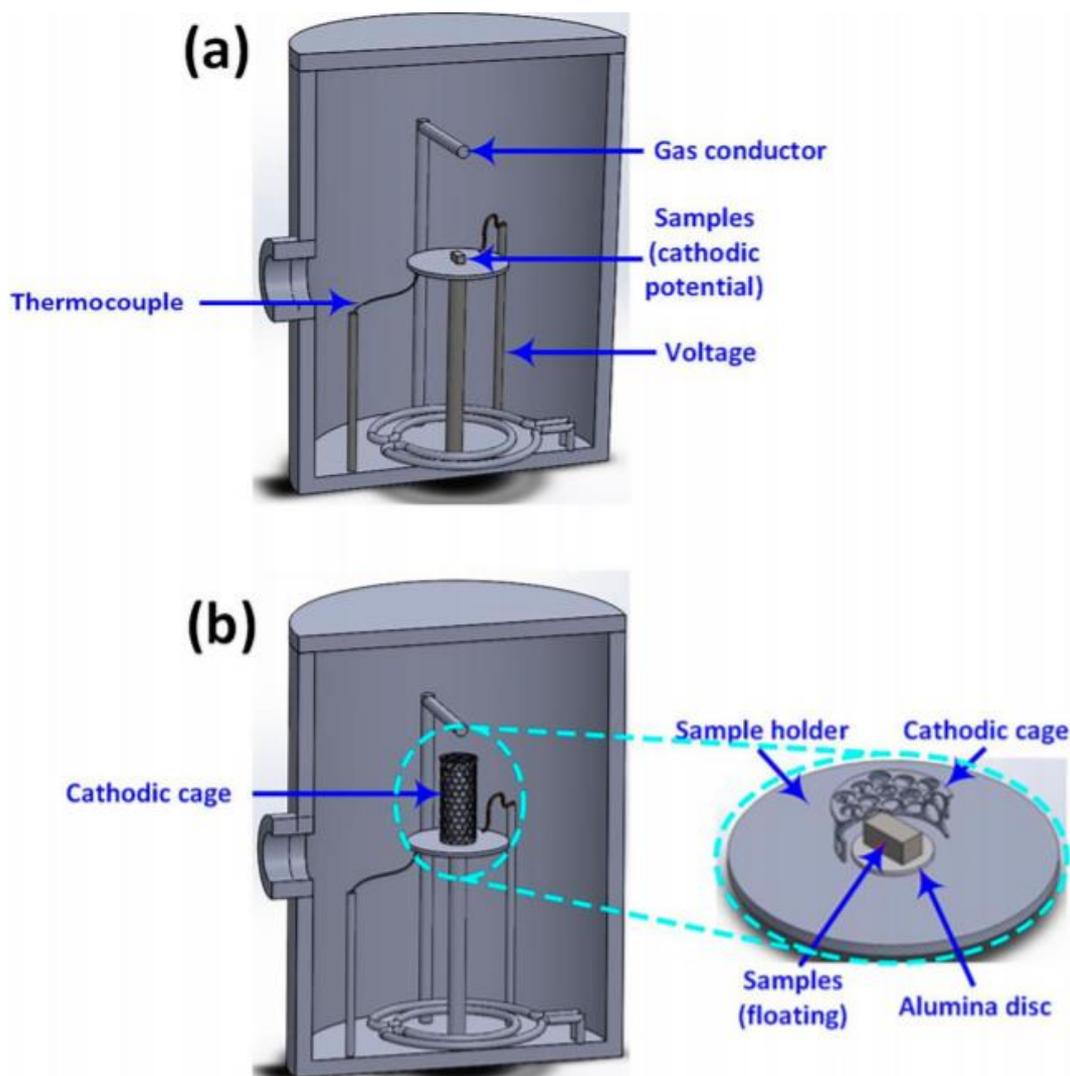
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

Foram utilizadas oito brocas comerciais helicoidais de aço rápido sem revestimento superficial e duas brocas com revestimento superficial. Seguindo a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas [12], as brocas são do tipo N, com comprimento do corpo (parte helicoidal) de 81 mm, comprimento total de 125 mm e diâmetro de 9 mm.

### 2.2 Tratamento

O equipamento utilizado para os tratamentos a plasma está ilustrado na figura 01 onde pode ser constatada a diferença entre os tratamentos de Nitretação convencional e a deposição por gaiola catódica. Na figura 1 (a) é possível verificar que a amostra fica posicionada diretamente sobre o cátodo (assumindo potencial do cátodo) enquanto no esquema da deposição por gaiola catódica, figura 1(b), é possível verificar que as amostras assumem flutuante, pois as mesmas estão sobre um disco de alumina [9].



**Figura 1:** Visualização esquemática (a) sistema de Nitretação a plasma convencional (b) sistema de deposição por gaiola catódica com corte em destaque para como a amostra é posicionada dentro da gaiola [9]

As condições de tratamento estão descritas na Tabela 1, a Nitretação convencional foi realizada nas temperaturas de 350, 400, 450 e 500°C mostra as condições em que foram realizados os tratamentos. Essas temperaturas foram escolhidas com base em trabalhos prévios [14-15], permitindo-se mapear o comportamento em uma faixa ampla de temperatura, entretanto, devido a limitações do equipamento a temperatura máxima foi de 500°C.

O tratamento duplex é dividido em duas etapas. A primeira delas é a nitretação, que foi realizada nas mesmas condições do tratamento de Nitretação a plasma. Na segunda etapa foi realizada deposição utilizando a técnica de deposição com gaiola catódica. As brocas foram posicionadas sobre um disco de alumina e envoltas por uma gaiola de titânio. A pressão utilizada na deposição foi de 1,24 Torr, que foi a menor possível dentro das limitações do equipamento, trabalhos como o de Bilek [15] mostraram que a eficiência do tratamento aumenta com a redução da pressão de tratamento.

**Tabela 1:** Condições dos tratamentos aplicados nas brocas.

BROCAS	NITRETAÇÃO CONVENCIONAL		DEPOSIÇÃO COM GAIOLA CATÓDICA	
N350	LIMPEZA POR SPUTTERING	SPUTTERING	LIMPEZA POR SPUTTERING	SPUTTERING

	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 350 °C Pressão: 3 Torr Duração: 5,0 h		
<b>Dx 400</b>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>
	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 400 °C Pressão: 3 Torr Duração: 5,0 h	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 400 °C Pressão: 1,24 Torr Duração: 5,0 h
<b>N450</b>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>
	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 450 °C Pressão: 3 Torr Duração: 5,0 h		
<b>N500</b>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>
	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 500 °C Pressão: 3 Torr Duração: 5,0 h		
<b>Dx 500</b>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>	LIMPEZA POR <i>SPUTTERING</i>	<i>SPUTTERING</i>
	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 500 °C Pressão: 3 Torr Duração: 5,0 h	Gases: 50% H <sub>2</sub> /50% Ar Temperatura: 350 °C Pressão: 1 Torr Duração: 1:00 h	Gases: 75% H <sub>2</sub> /25% N <sub>2</sub> Temperatura: 500 °C Pressão: 1,24 Torr Duração: 5,0 h

### 2.3 Caracterização

As ferramentas foram caracterizadas por ensaio de microdureza Vickers utilizando um microdurômetro IN-SIZE modelo ISH-TDV 1000. Para avaliar a dureza na superfície de folga das brocas, foram realizadas dez medidas em cada amostra e calculada a média aritmética. A carga utilizada foi de 0,2 kgf com tempo de aplicação de 15 s, seguindo a norma ASTM E-384 [17]. Além da dureza superficial foi avaliada a dureza do núcleo ao longo do corpo das brocas, foram feitas cinco medidas para cada amostra e apresentado como resultado a média aritmética das cinco. A carga utilizada foi de 0,1 kgf com tempo de 15 s.

A microestrutura das brocas comerciais foi estudada por meio de microscopia Óptica utilizando Microscópio Óptico Zeiss (modelo AxioCam ICC 5 e software AxioVs40x64 V4.9.1.0). As camadas nitretadas e a camada depositada das brocas tratadas foram avaliadas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV Tescan (modelo Vega XMU).

O desempenho das brocas foi simulado utilizando um Centro de Usinagem por Comando Numérico – CNC, Romi - modelo D600. Os testes de usinagem foram realizados em aço SAE4340. O corpo de prova foi modelado no software SolidWorks e suas dimensões foram determinadas respeitando as características de operação de furação profunda (profundidade de pelo menos 5 vezes o diâmetro [3,20]). A distância mínima, de 1,5 vezes o diâmetro, entre furos e entre os furos e as bordas do corpo de prova foi obedecida para que não influencie nos resultados [21].

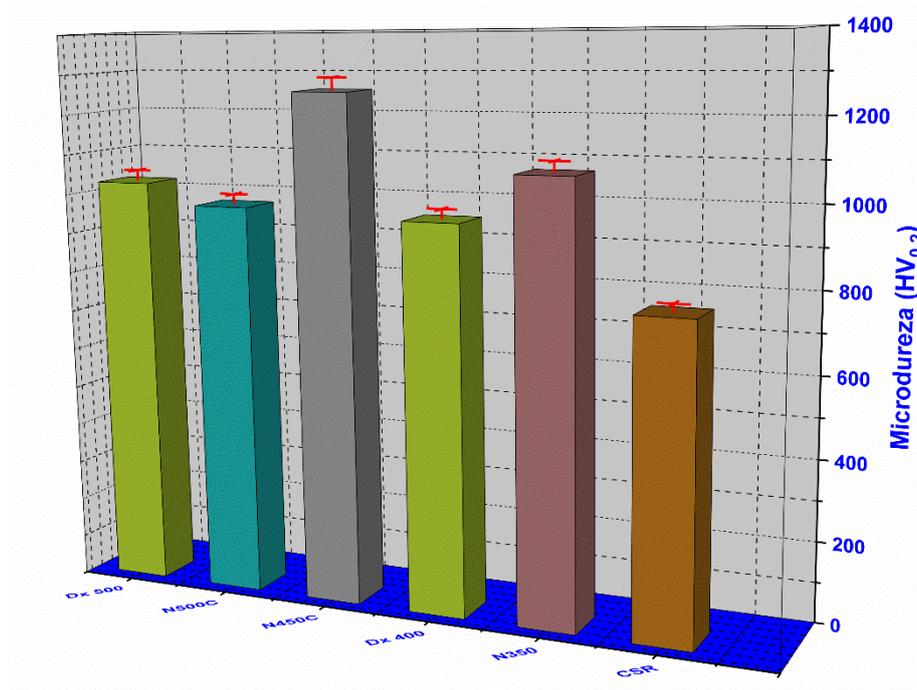
A cada quatro furos as ferramentas foram retiradas para verificação do desgaste de flanco. Foi utilizado um microscópio óptico modelo SZ-EWS-I007160 para aquisição das imagens da aresta de corte, que foram transferidas para o software *ImageJ*, onde o desgaste foi mensurado utilizando a ferramenta *Measu-*

re. Foram adotados quatro critérios de parada: o desgaste de flanco máximo “VB<sub>máx</sub>” de 0,5 mm, a falha completa da ferramenta (incluindo o lascamento da aresta de corte), a ocorrência excessiva de ruído e o número máximo de 20 furos (devido a limitação de material para usinagem dos corpos de prova). Sendo determinante o que ocorresse primeiro.

Para avaliação da qualidade dimensional dos furos, os diâmetros foram medidos utilizando um projetor de perfil Insize - modelo ISP-Z3015. As medidas foram utilizadas para verificação da tolerância dimensional. Segundo a fabricante de ferramentas Dormer [22] a tolerância é H12 para brocas de aço rápido para utilização geral, portanto, as dimensões mínima e máxima do furo, de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas [23] são, respectivamente, 9,000 mm e 9,150 mm.

### 3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta um gráfico com a média e os desvios-padrão amostrais das medidas de microdureza realizadas na superfície de folga das brocas.



**Figura 2:** Gráfico de média e desvio-padrão da microdureza da superfície de folga das brocas CSR, N350, Dx400, N450 e Dx500.

A Figura 3 apresenta as medidas de dureza do núcleo ao longo do corpo das brocas, cortes A, B e C. As identações realizadas no microdurômetro ultrapassam o valor recomendado pela norma ASTM E-384[17], que é de 10% da espessura de camada, logo as medidas de microdureza apresentadas são inferiores às da dureza real da camada nitretada, podendo sofrer influência do substrato. Na deposição utilizando gaiola catódica não há gradiente de temperatura ao longo do comprimento das amostras [29].

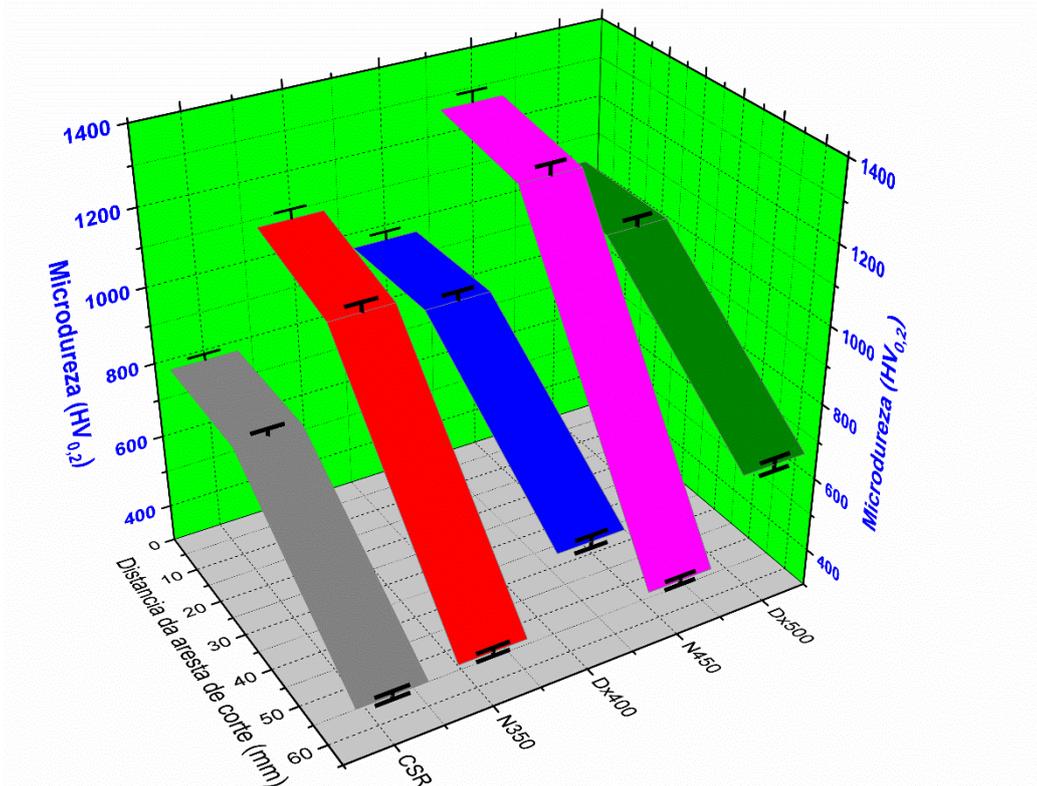


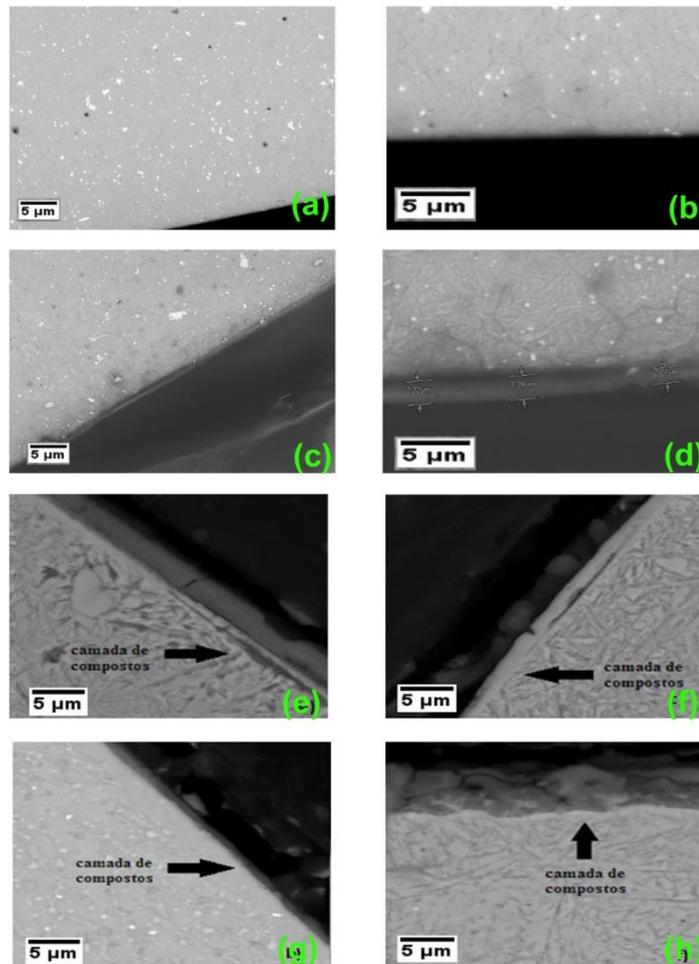
Figura 3: Gráfico de dureza do núcleo ao longo do corpo das brocas CSR, N450 e N500.

A Tabela 2 mostra os resultados da análise por EDS da broca comercial sem revestimento – CSR

Tabela 2: Análise quantitativa EDS da broca comercial sem revestimento – CSR.

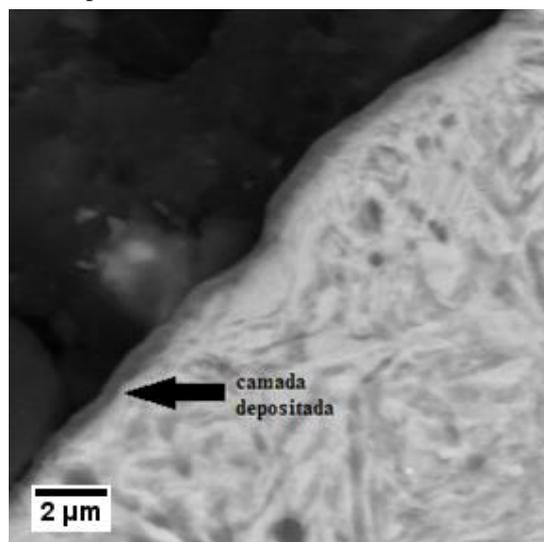
ELEMENTO	PESO (%)	ÁTOMO (%)
Si	1,07	2,10
Cr	5,28	5,59
Fe	93,64	92,30

A Figura 4 apresenta a micrografia das seções transversais obtidas das brocas N350, Dx400, N450 e Dx500 °C.



**Figura 4:** Microscopia eletrônica de varredura das seções transversais das brocas tratadas (a) CSR com aumento de 2500 vezes (b) CSR com aumento de 5000 vezes; (c) N350 com aumento de 2500 vezes; (d) N350 com aumento de 5000 vezes; (e) N450 com aumento de 5000 vezes; (f) N450 com aumento de 5000 vezes; (g) Dx500 com aumento de 5000 vezes e (h) Dx500 com aumento de 5000 vezes.

A Figura 5 apresenta a micrografia da amostra transversal da broca submetida ao tratamento duplex. O corte transversal foi feito próximo à ponta da ferramenta.



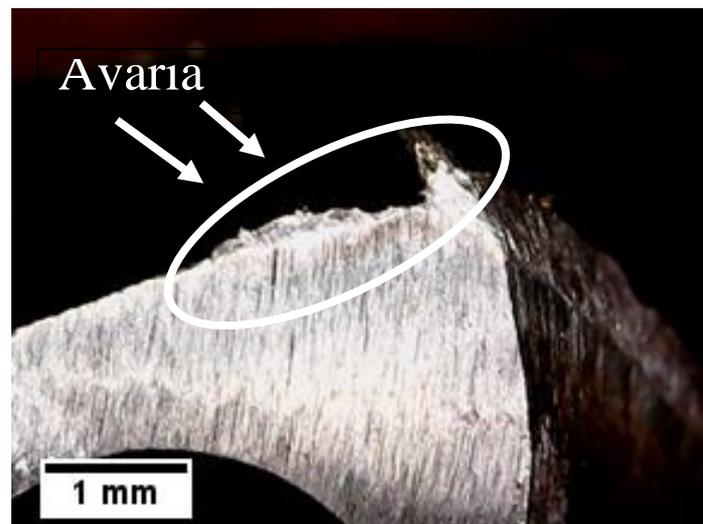
**Figura 5:** Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal (corte A) da broca Dx500.

A Tabela 3 apresenta as medidas de espessura das camadas apresentadas na Figura 5 e na Figura 6.

**Tabela 3:** Medidas de espessura da camada de compostos nas brocas nitretadas a 450 °C e 500°C e do filme fino na broca submetida a tratamento duplex a 500 °C.

TRATAMENTO	CORTE	ESPESSURA DA CAMADA DE COMPOSTOS ( $\mu\text{M}$ )	ESPESSURA DO FILME FINO ( $\mu\text{M}$ )
NITRETADA A 350 °C	Ponta (A)	2,95	-
	Meio (B)	2,02	-
	Haste (C)	1,45	-
DUPLEX (400 °C)	Ponta (A)	2,75	-
	Meio (B)	1,86	1,2
	Haste (C)	1,12	-
NITRETADA A 450 °C	Ponta (A)	2,80	-
	Meio (B)	1,94	-
	Haste (C)	1,22	-
NITRETADA A 500 °C	Ponta (A)	5,78	-
	Meio (B)	2,50	-
	Haste (C)	0,86	-
DUPLEX (500 °C)	Ponta (A)	5,69	0,64

A Figura 6 mostra uma foto da broca nitretada a 500°C após interrupção da usinagem no primeiro furo.



**Figura 6:** Broca nitretada à 500°C após ensaio de desempenho.

Os resultados de desgaste de flanco das brocas CSR, N350, Dx400, N450 e Dx500 em função do número de furos realizados são apresentados na Figura 7. O resultado não inclui a broca N500 por ela ter falhado ainda no primeiro furo.

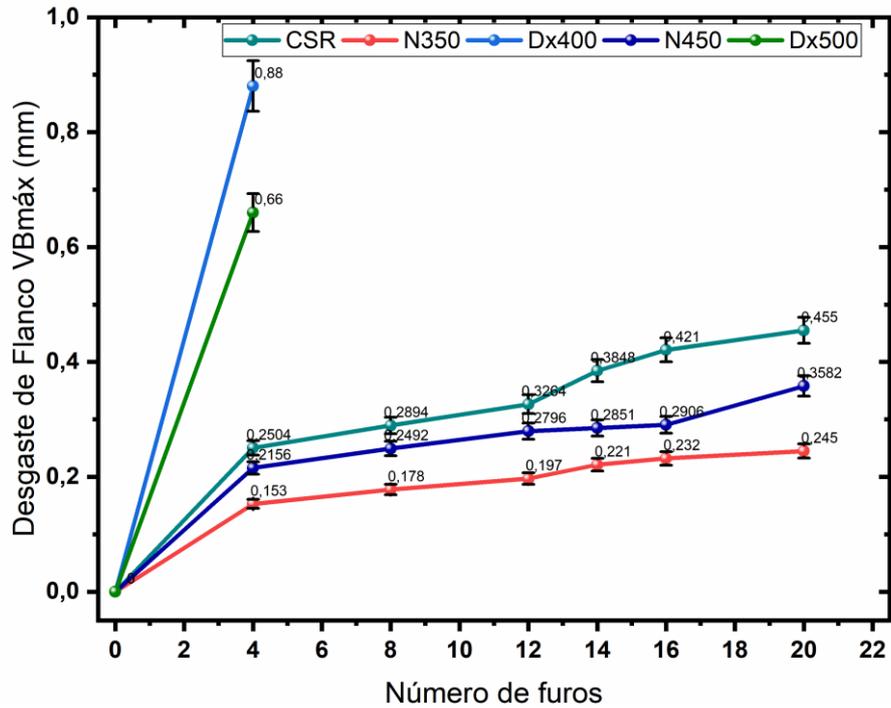


Figura 7: Desgaste de flanco das brocas CSR, N450 e Duplex.

A Figura 8 apresenta os valores das medidas de diâmetro dos furos, e os diâmetros máximo e mínimo permissíveis de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas [23], para a tolerância dimensional 9H12, definida para operações de furação em geral [22]. São apresentados os resultados das brocas CSR, CCR, N450 e Duplex. A broca N500 não aparece nos resultados por ter falhado antes que fosse completado o primeiro furo.

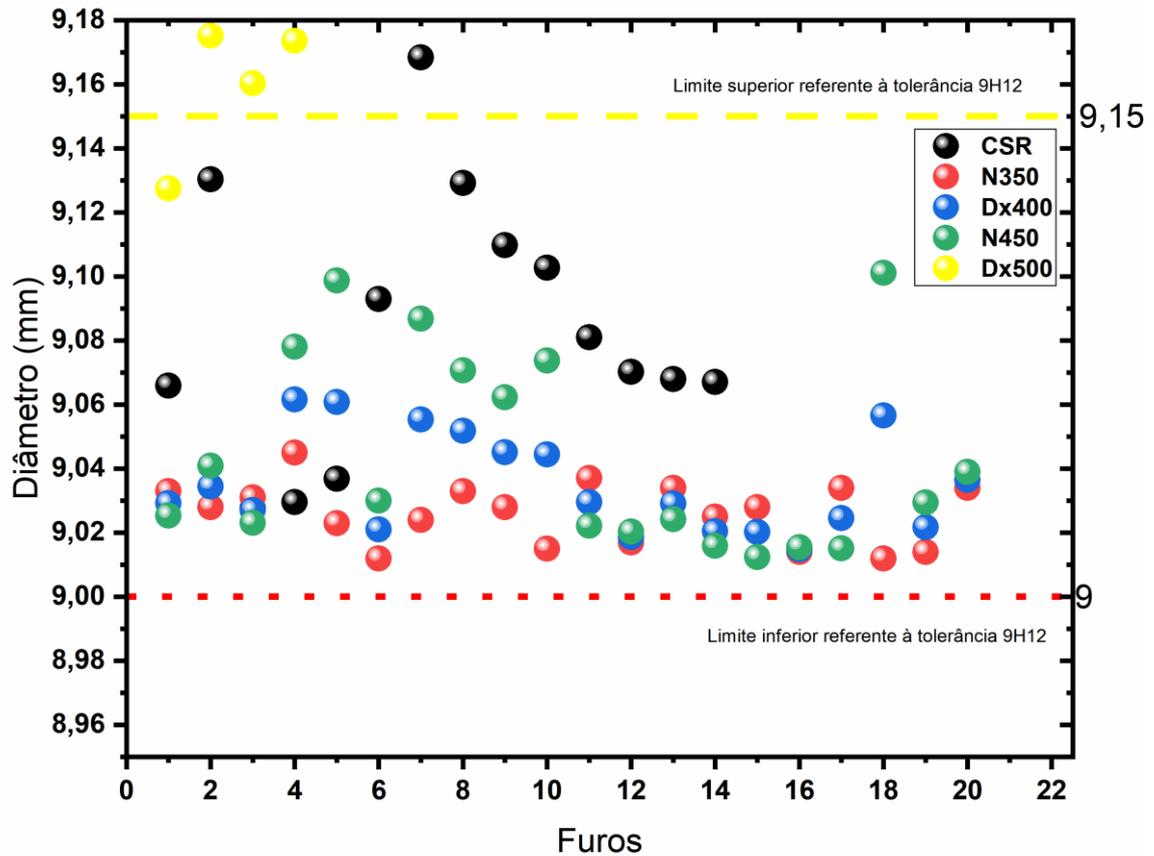


Figura 8: Diâmetro dos furos das brocas CSR, CCR, N450 e Duplex.

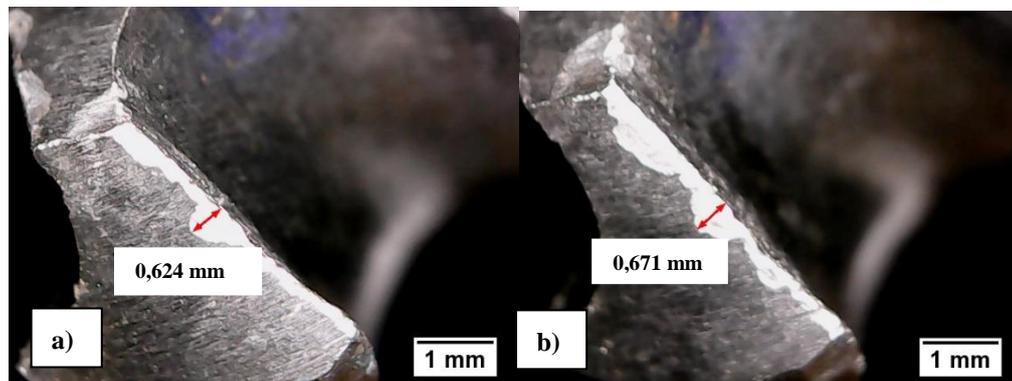


Figura 9: Desgaste de flanco nas arestas de corte da broca Dx500 após usinagem do 4º furo.

#### 4. DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Figura 2 mostram que a dureza média na broca CSR (772,0 HV), comportamento esperado uma vez que essa ferramenta passa pelo tratamento térmico de têmpera para aumentar a dureza do aço SAE M2. Os quatro tratamentos provocaram aumento na dureza superficial. Na broca N450 o valor da microdureza superficial média foi 53,22% maior do que na broca CSR. A broca Dx500 apresentou dureza superficial média de 978,8 HV, o aumento devido o tratamento foi de 18,88%. A broca Dx500 apresentou valor para a dureza superficial média superior a N500, alcançando a média de 1030,6 HV, com aumento percentual de 25,32% com relação ao material de partida, devido a presença do filme de TiN

depositado.

O crescimento da dureza superficial com o aumento da temperatura de tratamento, concorda com os resultados obtidos por Hiraoka *et al.* [24] e Zagone *et al.* [14]. Outra consequência do aumento da temperatura é a intensificação do *sputtering* da superfície, que resulta em um aumento da rugosidade superficial [24–27], a maior variabilidade das medidas de microdureza da broca N500 em comparação à N450 podem estar relacionadas a essa alteração.

As medidas de microdureza superficial na broca duplex apresentaram como resultado uma média de dureza maior do que a N500, pois um dos objetivos da aplicação de revestimentos de TiN é a redução da rugosidade [28] e de acordo com De Sousa *et al.* [29] a uniformidade da camada depositada é uma das vantagens da técnica de deposição com gaiola catódica.

A Figura 3 mostra uma diminuição na dureza do núcleo da broca comercial, de 780 HV próximo à ponta (corte A) até 437 HV na junção entre o corpo e a haste (corte C). Essa diferença pode estar associada a um gradiente de temperatura estabelecido durante o tratamento térmico de têmpera, tratamentos conhecidos como “*tailored tempering*”, importantes para aplicações em que as solicitações mudam em regiões distintas [30,31].

As medidas de dureza representadas na Figura 3 mostram que as duas temperaturas aplicadas na nitretação convencional provocaram redução de dureza no núcleo das brocas, o que indica a ocorrência de revenimento durante o tratamento. A redução de dureza durante o revenimento é conhecida como fragilização por revenido e ocorre devido a uma difusão do carbono retido na estrutura martensítica, diminuindo o estado de tensões gerado pela têmpera. Nos aços convencionais quanto maior a temperatura, maior a redução de dureza devido ao revenido [32]. Essa redução contínua de dureza não foi observada nas brocas nitretadas, pois, comparando por exemplo, a dureza do substrato nos cortes A e C da broca tratada a 500 °C observa-se uma maior redução de dureza na região do corte C, enquanto, no corte A a dureza do substrato é a mesma da broca sem tratamento (CSR). Esse comportamento se deve ao endurecimento secundário provocado pela precipitação dos carbonetos de elementos de liga à uma faixa de temperatura que depende da composição do aço [33].

A diferença de sensibilidade ao revenido mostrada na Figura 2, está relacionada com o gradiente térmico estabelecido. Durante a nitretação a plasma, o *sputtering* é mais acentuado na parte superior das peças, provocando um aquecimento maior nessa região. Analisando os resultados da broca N450 é possível observar que a temperatura crítica para o revenimento é maior do que 450°C, já que a redução não foi observada no corte realizado próximo a haste (corte C). Na broca N500 pode-se observar que o endurecimento secundário para o material ocorre em temperaturas acima de 500°C, pois no corte C verificou-se redução acentuada de microdureza, enquanto nos cortes A e B não foi observada redução de dureza. Esses resultados mostram que as temperaturas estabelecidas nessas regiões estão na faixa em que acontece o endurecimento secundário por precipitação.

A ocorrência de revenimento durante a nitretação abre a possibilidade de aplicação simultânea de revenimento e nitretação, que pode contribuir para redução de custos e tempos de fabricação, através da eliminação de uma etapa de processamento. Trabalhos como o de Prass, Fontana e Recco [34] começam a estudar essa alternativa.

A análise por EDS da broca CSR revelou a presença dos elementos de liga silício – Si e cromo – Cr, conforme pode ser visualizado na Tabela 2. Esses elementos de liga estão diretamente relacionados com o comportamento apresentado na Figura 3. A presença de Si eleva a temperatura crítica da fragilização por revenido, retardando a precipitação da austenita retida [32]. Já o cromo permite maior resposta ao revenimento, intensificando o endurecimento secundário [33].

Na Figura 4 pode-se notar que a camada de compostos foi formada nas duas condições de nitretação em todas as regiões analisadas. A camada das brocas N350, Dx400 e N450 apresenta uma maior uniformidade com relação à N500. A uniformidade diminui no sentido da ponta das brocas, segundo De Araújo *et al.* [7] na nitretação de peças de maior altura a taxa de *sputtering* é maior na superfície superior, essa diferença se deve ao direcionamento do movimento das espécies ativas do plasma, e acaba formando camadas mais uniformes na superfície lateral dessas peças. Pode-se observar que com o aumento da temperatura de tratamento a uniformidade das camadas diminui comparando a Figura 4 (f) com Figura 4 (g), esse resultado está de acordo com os apresentados por Aguajani, Torshizi e Soltanieh [37].

Na Figura 6 é possível observar a fina camada depositada logo acima da camada nitretada, as irregularidades na superfície são originárias da nitretação convencional a 500 °C, realizada na primeira etapa do tratamento e, também, sofre influência do processo de corte das amostras. A camada da broca N500 apresentada na Figura 4 (g) tem aspecto semelhante.

Na Tabela 3 pode ser notada a variação da espessura de camada ao longo do corpo das brocas submetidas à nitretação convencional, de forma que a espessura cresce no sentido da haste para a ponta, esse comportamento está associado ao gradiente térmico que foi evidenciado nos resultados de microdureza e estudado anteriormente no trabalho de Lima *et al.*[38], o aumento da temperatura no mesmo sentido justifica o crescimento de espessura da camada [37,39]. A variação de espessura da camada também se deve a geometria da broca que apresenta superfície lateral bem maior do que a frontal, o que leva a espessuras de camada maiores nas regiões mais próximas da superfície superior das peças, comportamento semelhante foi observado por De Araújo *et al.* [7].

Nas duas condições de nitretação, observa-se que nas regiões superiores (corte A e B) as medidas de espessura de camada na broca N500 foram menores do que na N450, evidenciando que as ferramentas podem ter sofrido um processo de revenimento, diminuindo assim a dureza do substrato. Já as medidas na região mais próxima à haste (corte C) não apresentaram a mesma tendência, esse resultado pode ter sofrido influência da geometria da broca, devido a possibilidade de variação do ângulo de incidência dos íons na região das bordas, deixando de incidir perpendicularmente na superfície, o que causa a diminuição proporcional da taxa de *sputtering*, contribuindo para a formação de camadas menos espessas [7]. A broca nitretada a 500 °C apresentou o pior resultado no ensaio de desempenho, falhando antes que fosse completado o primeiro furo.

Na Figura 6 pode-se observar que houve o lascamento da aresta de corte, que provocou um desbalanceamento no processo de furação, acompanhado de uma elevação do nível de ruído. O lascamento da aresta de corte pode estar associado à formação de uma aresta de corte muito dura, devido à elevada temperatura de tratamento e ao efeito de borda (onde a camada nitretada tende a ser maior) que é característico da nitretação convencional, esse efeito torna-se mais crítico a medida que a temperatura de tratamento aumenta, produzindo camadas menos uniformes [7], como foi observado na microscopia eletrônica de varredura apresentada na Figura 5 e na variabilidade das medidas de microdureza na Figura 2.

A Figura 7 mostra um comportamento semelhante para as brocas N350, Dx400, N450 e CSR. As ferramentas apresentaram inicialmente uma taxa de desgaste maior nos 4 primeiros furos e depois mantiveram uma taxa aproximadamente constante até os furos 12, 16 e 20. Algumas brocas apresentaram desempenho satisfatório, entretanto tiveram a usinagem interrompida devido ao elevado nível de ruído, que segundo Santos, Kieckow e Casarin [3] está relacionado com a presença do mecanismo de desgaste por adesão combinado com desgastes de flanco elevados.

A Figura 8 mostra que as brocas N350, Dx400 e N450 usinaram o máximo de furos previstos (20 furos) sem que chegassem ao final da vida útil. A nitretação à 450°C aumentou a resistência ao desgaste de flanco com relação ao material de partida, uma vez que, após a usinagem do 20° furo o desgaste de flanco apresentado (0,358 mm) ainda foi menor do que o apresentado pela broca CSR, que já apresentava desgaste de flanco elevado (0,385 mm) no 14° furo, no 16° furo o desgaste da broca N450 era de apenas 0,291 mm. Esse resultado se deve ao aumento de dureza verificado com a nitretação e à maior uniformidade da camada com relação ao tratamento a 500 °C, diminuindo o nível de tensões internas.

A broca submetida ao tratamento duplex não apresentou desempenho satisfatório, foram feitos apenas 4 furos e o critério de parada foi o desgaste máximo de flanco igual a 0,660 mm (ultrapassando o limite de 0,5 mm), conforme representado na Figura 8. O mau desempenho pode estar associado a uma má adesão do filme ou à rugosidade superficial da broca duplex (originada na primeira etapa do tratamento), que foi sugerida através da variabilidade dos resultados de microdureza na Figura 1. Segundo Lima e Ferraresi [40] quanto maior a rugosidade, menor a resistência ao desgaste abrasivo.

Os resultados apresentados na Figura 8 mostram que com relação a tolerância dimensional os melhores resultados foram os associados à broca N450, a única que usinou todos os furos dentro da tolerância H12 para as condições de usinagem recomendadas para brocas de aço rápido [22,41,42].

A broca Dx500 mais uma vez apresentou resultado insatisfatório, dos 4 furos usinados apenas 1 atendeu a tolerância dimensional e os demais tiveram diâmetros maiores que o máximo permissível, o aumento do diâmetro dos furos pode estar relacionado a um desbalanceamento causado por o desgaste desigual das arestas de corte da ferramenta durante a usinagem, essa diferença está representada na Figura 9.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram a eficácia da aplicação da nitretação a plasma no aumento da dureza superficial de brocas de aço rápido HSS. Foi observado que a dureza cresce com o aumento da temperatura de tratamento.

O tratamento a 450 °C produziu camadas mais uniformes. A uniformidade da camada cresce na dire-

ção da ponta para a haste, enquanto a espessura cresce no sentido contrário.

Para a usinagem do aço SAE 1045 a broca nitretada a 450 °C - N450, apresentou o melhor desempenho entre todas as brocas ensaiadas, contribuindo para o aumento da vida útil da ferramenta e para a melhoria da qualidade dimensional nas operações de furação profunda.

A nitretação a 500 °C produziu uma camada dura e frágil, mostrando-se inadequada para a aplicação estudada. Além disso, a nitretação nessa temperatura não ofereceu a adesão necessária para o revestimento de nitreto de titânio (TiN).

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à CAPES por financiar parte desse trabalho.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] BAPTISTA, E.A., COPPINI, N.L., “Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem Com Auxílio de Sistema Especialista”, In: *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, p. 8, Salvador, 2001.
- [2] BHASKAR, S. V., KUDAL, H.N., “Tribology of nitrided-coated steel-a review”, *Archives of Mechanical Technology and Materials*, v. 37, pp. 50–57, abr. 2017.
- [3] SANTOS, E.M., KIECKOW, F., CASARIN, J. J., “Avaliação Do Desgaste De Brocas Helicoidais De Aço-Rápido (Hss) Modificadas Superficialmente Por Nitretação a Plasma”, *Rev. Eletrônica Extensão Da URI*, v.9, pp. 68–76, mar. 2013.
- [4] KIM, D.W., LEE, Y.S., PARK, M.S., *et al.*, “Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 49 pp. 246–255, set. 2009.
- [5] KISHUROV, V.M., IPPOLITOV, V.N, KISHUROV, M. V., *et al.*, “Influence of Wear-Resistant Coatings on Tool Performance”, *Russian Engineering Research*, v. 32, n.2, pp. 182–185, 2012.
- [6] CHEN, H.Y, STOCK, H.R., MAYR, P. “Plasma-Assisted Nitriding of Aluminium”, *Surface and Coatings Technology*, v. 64, pp. 139–147, nov 1993.
- [7] ARAÚJO, F.O., DE SOUSA, R.S., DE ARAÚJO, A.K.G., *et al.*, “Nitretação a Plasma De Aço Inoxidável Austenítico Aisi 316”, *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 26 pp. 31–35, mar. 2007.
- [8] ROUSSEAU, A.F., PARTRIDGE, J.G., MAYES, E.L.H., *et al.*, “Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 High Speed Steel tools”, *Surface and Coatings Technology*, v. 272, pp. 403–408, abr. 2015.
- [9] ABREU, L. H. P., *et al.* "Plasma nitriding of AISI M2 steel: performance evaluation in forming tools." *Surface Engineering* 36.5 (2020): 508-515..
- [10] DE SOUSA, R.R.M., MOURA, Y.J.L., SOUSA, P.A., *et al.*, “Nitriding of AISI 1020 steel: comparison between conventional nitriding and nitriding with cathodic cage”, *Materials Research*, v. 17, n. 3, p. 708-713, 2014.
- [11] BASHIR, M.I., SHAFIQ, M., NAEEM, M., *et al.*, “Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding”, *Surface and Coatings Technology*, v. 327, pp. 59–65, ago. 2017.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Brocas helicoidais - Termos, definições e tipos, in: Rio de Janeiro, 2009.
- [13] BORGIOLO, F., FOSSATI, A., GALVANETTO, E., *et al.*, “Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: Influence of treatment temperature”, *Surface and Coatings Technology*, v. 200, pp. 2474–2480, set. 2005.
- [14] ZAGONEL, L.F., FIGUEROA, C.A., DROPPA, R., *et al.*, “Influence of the process temperature on the steel microstructure and hardening in pulsed plasma nitriding”, *Surface and Coatings Technology*, v. 201, pp. 452–457, jan. 2016.
- [15] BILEK, M.M.M., MARTIN, P.J., MCKENZIE, D.R., “Influence of gas pressure and cathode composition on ion energy distributions in filtered cathodic vacuum arcs”, *Journal of Applied Physics*, v. 83, pp. 2965–2970, mar. 1998.

- [16] SOUSA, R.R.M., ARAÚJO, F.O., RIBEIRO, K.J.B., *et al.*, “Cathodic cage nitriding of samples with different dimensions”, *Materials Science and Engineering A*, v. 465, pp. 223–227, mar. 2007.
- [17] JOHNSON, K.L., “The correlation of indentation experiments”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 18, n. 2, p. 115-126, 1970.
- [18] GU, K., LV, L., LU, Z., *et al.*, “Electrochemical corrosion and impedance study of SAE1045 steel under gel-like environment”, *Corrosion Science*, v. 74, pp.408–413, maio 2013.
- [19] SHEIKH, M.A., QASIMA, A., NISAR, S., *et al.*, “Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA”, *Simulation Modelling Practic and Theory*, v. 59, pp. 36–51, set. 2015.
- [20] MARQUES, F. M., ROCHA, A. S., CAVALER, L.C.C., *et al.*, “Caracterização de desgaste de brocas de HSS revestidas com AlCrN e não revestidas, em ensaio de furação, na usiagem de ferro fundido nodular DIN GGG 50”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, v. 19, pp. 87–104, ago. 2015.
- [21] RODRIGUES, J.R.P., NEVES, T.E.S.B.N., *et al.*, “Study of the application of sunflower oil in the process of drilling ABNT 1045 steel”, *Acta Sci. Technol.*, v. 19, n. 2, pp. 87–104, jun. 2015.
- [22] DORMER, Catálogo catalogue, (2015)  
[https://www.dormerpramet.com/downloads/dorcatalogue2015\\_v5\\_en.pdf](https://www.dormerpramet.com/downloads/dorcatalogue2015_v5_en.pdf). acessado em janeiro de 2018.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes, in: Rio de Janeiro, 1995.
- [24] HIRAOKA, Y., WATANABE, Y., UMEZAWA, O., “Effect of Nitriding Temperature and Compositions on Diffusion Layer’s Hardness in Gas Nitrided Low Alloy Steel Containing Chromium”, *J. Japan Inst. Met. Mater.*, v.80, 2016.
- [25] HOSSEINI,S.R., AHMADI, A. “Evaluation of the effects of plasma nitriding temperature and time on the characterisation of Ti 6Al 4V alloy”, *Vacuum*, v. 87, pp. 30–39, jan. 2013.
- [26] SHE, D., YUE, W., FU, Z., *et al.*, “Effects of nitriding temperature on microstructures and vacuum tribological properties of plasma-nitrided titanium”, *Surface and Coatings Technology*, v. 264, pp. 32–40, fev. 2015.
- [27] LI, Y., HE, Y., XIU, J.J., *et al.*, “Wear and corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding”, *Surface and Coatings Technology*, v. 329, pp. 184–192, nov. 2017.
- [28] ALI, M., HAMZAH, E., RADZI, M., “Friction coefficient and surface roughness of TiN-coated HSS deposited using cathodic arc evaporation PVD technique”, *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 60 pp. 121–130, 2008.
- [29] SOUSA, R.R.M., DE ARAÚJO, F.O., RIBEIRO, K.J.B., *et al.*, “Uniformity of temperature in cathodic cage technique in nitriding of austenitic stainless”, *Surface Engineering*, v. 24 pp. 313–318, jul 2008.
- [30] MERKLEIN, M., SVEC, T., “Hot stamping: manufacturing functional optimized components”, *Production Engineering*, v.7, pp. 141–151, 2013.
- [31] ZAPATA, G. M., BUTTON, S.T., “Austenita na estampagem a quente diferencial dos aços endurecidos ao boro DIN 22MNB5 E DIN 27MNCRB5”, In: *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, pp. 1-10, Salvador, maio 2015.
- [32] MARCOMINI, J. B., GOLDENSTEIN, H., “Nova liga Fe-C-Mn-Si-Cr para rolamentos”, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 9, n. 4, pp. 324–329, dez. 2012.
- [33] PINEDO, C. E., “Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte II - Tratamento Superficial”, In: *2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM*, pp.293–301, São Paulo, set. 2004.
- [34] PRASS, A.R., FONTANA, L.C., RECCO, A.A.C., “Nitretação por plasma com revenimento simultâneo do aço ferramenta VF 800AT”, *Revista Matéria*, v. 22, n. 2, fev. 2017.
- [35] PINEDO, C.E., MONTEIRO, W.A., “Influence\_of\_heat\_treatment\_an endurecimento secundário”, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 8, n. 2, pp. 86–90, abr. 2011.
- [36] SANTOS, W. C., PEREIRA NETO, J.O., DA SILVA, R.O., *et al.*, “Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido”, *Revista Matéria*, v. 20, n. 2, pp. 304–315., mar. 2015.
- [37] AGHAJANI, H., TORSHIZI, M., SOLTANIEH, M., “A new model for growth mechanism of nitride

layers in plasma nitriding of AISI H11 hot work tool steel”, *Vacuum*, v. 141, pp. 97–102, mar. 2017.

[38] LIMA, J. A., ALVES JR, C., SANTOS, C.A., “Estudo do Gradiente Térmico no Processo de Nitretação a Plasma ThermalGradientStudyin the Plasma Nitriding Process”, *Revista Matéria*, v. 10, n. 2, pp. 273–283, jun. 2005.

[39] CAVALIERE, P., PERRONE, A., SILVELLO, A. “Multi-objective optimization of steel nitriding”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 19, pp. 292–312, 2016.

[40] LIMA, A.C., FERRARESI, V.A., “Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira”, *Soldagem e Inspecao*, v. 14, n. 2, pp. 140–150, jun. 2009.

[41] AMATOOLS, Tabela\_de Velocidade\_de\_Corte\_para\_Brocas.pdf, (2017) 1.  
[http://www.amatools.com.br/html/amatools/arquivos/Tabela\\_de Velocidade\\_de\\_Corte\\_para\\_Brocas.pdf](http://www.amatools.com.br/html/amatools/arquivos/Tabela_de_Velocidade_de_Corte_para_Brocas.pdf).  
acessado em janeiro de 2018.

[42] OSG Sulamericana, Brocas, 55, 2017.  
[https://internacionalferramentas.com.br/fornecedores/osg/osg\\_brocas.pdf](https://internacionalferramentas.com.br/fornecedores/osg/osg_brocas.pdf). acessado em janeiro de 2018.

#### ORCID

PettesonLinniker Carvalho Serra	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0030-3496">https://orcid.org/0000-0002-0030-3496</a>
João Rodrigues de Barros Neto	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2692-0211">https://orcid.org/0000-0003-2692-0211</a>
André Sales Aguiar Furtado	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6848-3406">https://orcid.org/0000-0001-6848-3406</a>
Wesley Rick Viana Sampaio	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0721-6766">https://orcid.org/0000-0002-0721-6766</a>
Michelle Cequeira Feitor	<a href="https://orcid.org/0000-0002-4850-9493">https://orcid.org/0000-0002-4850-9493</a>
Thercio Henrique de Carvalho	<a href="https://orcid.org/0000-0001-7429-4273">https://orcid.org/0000-0001-7429-4273</a>
Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2062-6505">https://orcid.org/0000-0003-2062-6505</a>