

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDSON MAURICIO JOLY  
ISAAC MATOS PREIZNER

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2  
SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

EDSON MAURICIO JOLY

ISAAC MATOS PREIZNER

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2  
SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr, Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA

2015

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2 SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA", realizado pelos alunos Edson Mauricio Joly e Isaac Matos Preizner, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr, Rodrigo Lupinacci Villanova

UTFPR - Damec

Curitiba, 16 de julho de 2015.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2 SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA", realizado pelos alunos EDSON MAURICIO JOLY E ISAAC MATOS PREIZNER, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr, Rodrigo Lupinacci Villanova

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Dr, Eduardo Mauro do Nascimento

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr, Marcio Mafra

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 16 de julho de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Edson Mauricio Joly**

Primeiramente agradeço a Deus por me dar força para conquistar meus objetivos.

Ao meu amigo e companheiro de trabalho Adriano Moreno por todo apoio e ensinamento, sempre se mostrou proativo em ajudar e a passar seus conhecimentos.

As empresas SDS Plasma, TOZ Soluções Industriais, Support Ferramentas e Aços Favorit Distribuidora, por todo apoio para a execução do projeto e interesse no desenvolvimento de melhorias na tecnologia.

Ao Prof. Dr, Rodrigo Lupinacci Villanova pelos ensinamentos.

A toda a minha família, em especial meus pais e meu irmão, que apesar de cada obstáculo que nos deparamos nessa vida, sempre me ajudam a encontrar um desvio e ir ao caminho certo.

Ao meu amigo e também autor deste projeto Isaac Matos Preizner pelo apoio e ajuda.

Agradeço todos os verdadeiros amigos que Deus colocou em minha vida, em especial: Guilherme Elias Monteiro Egg, Felipe Coelho Simas, Denis Camillo dos Santos, Eduardo Dering, Matheus Matsumoto Coimbra, Caio Vinícius Garcia Morales, Thales Augusto Barbosa Pinto Silva, Júlia Bortoluzzi Barbieri, Marcela Ferraz Guimarães, Júlia Cristina de Carli e Daphene Marques Solis.

Em especial a minha namorada Thainá Caroline Geronasso, que sempre me apoiou e torceu pelo meu sucesso.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Isaac Matos Preizner**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por todas as conquistas que alcancei, a quem deposito minha total confiança.

Em seguida, agradeço a todos que contribuíram para o total sucesso desse trabalho, em especial aos funcionários da SDS Plasma, liderados por Adriano Moreno, que deram todo o suporte necessário, desde o início até o final deste trabalho. Também às empresas parceiras desse projeto a Favorit Aços Especiais, representada pela vendedora Daniella C. Câmara; a TOZ Soluções Industriais, representada por Alex Sandro Moraes e a Support Ferramentas, através de seu diretor Fernando Antunes Pereira que contribuíram substancialmente para o êxito desta jornada.

Também gostaria de agradecer aos professores do Grupo de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em especial ao nosso orientador Rodrigo Lupinacci Villanova, responsável por todo o suporte teórico do nosso trabalho. Não menos importante, agradeço também ao professor Eduardo Mauro do Nascimento, que me deu a oportunidade de ser seu aluno no Programa de Iniciação Científica da UTFPR, aprofundando meus conhecimentos na área de nitretação a plasma.

À minha família, principalmente a figura da minha mãe Margarida, que me deu total apoio e incentivo para a continuação dessa jornada.

Aos meus amigos da UTFPR, tanto aos que passaram, como os que vou levar para sempre na minha vida, em especial ao meu parceiro de projeto Edson Mauricio Joly, fundamental para o bom andamento deste estudo e também à minha parceira de laboratório Sabrina Rodrigues Meira, que também nos ajudou imensamente.

*“Na adversidade alguns desistem, enquanto outros batem recordes.”*

**Ayrton Senna**

## RESUMO

JOLY, Edson Mauricio; PREIZNER, Isaac Matos. AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2 SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A nitretação a plasma está se tornando cada vez mais comum entre os processos de tratamentos de superfície. Uma das aplicações deste processo se dá em ferramentas de usinagem de aço rápido. Neste estudo, foram efetuadas análises de como a nitretação influenciou, especificamente, ferramentas para o processo de furação em aço ABNT 1045, aplicado com brocas helicoidais feitas de aço rápido tipo M2 de diâmetro inferior de 1,20 mm. Foram feitas avaliações de desgaste da ferramenta em número de furações para verificação do tempo de vida útil dessas brocas, além de análises metalográficas com o objetivo de verificar a influência da camada nitretada sobre o material a ser tratado, inclusive com verificações de aumento de dureza superficial. Os resultados obtidos mostraram um aumento de até 63% de número de furações para as ferramentas tratadas em atmosfera com composição de 6% de nitrogênio, tempo de tratamento de 30 minutos e temperatura de 390°C, quando comparadas a brocas em estado de fornecimento.

**Palavras-chave:** nitretação, furação, brocas de aço rápido, vida útil.



## ABSTRACT

JOLY, Edson Mauricio; PREIZNER, Isaac Matos. AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE BROCAS DE AÇO RÁPIDO M2 SUBMETIDAS AO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO A PLASMA. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The plasma nitriding is becoming increasingly common in the surface treatment processes. One of the applications of this process occur on high speed steel machining tools. This study realized analyses of how the nitriding has influenced tools in the drilling process of the ABNT 1045 steel with the application of twist drills made from M2 high speed steel with a diameter of less than 1.20 mm. In addition, wear evaluations of the tool were made from the number of drillings for verification of lifetime of these drills, beyond metallographic analyses with the aim of checking the influence of the nitrated layer on the material to be treated, including increase verifications of superficial hardness. Therefore, the obtained results showed an increase of up to 63% on the number of drillings for tools that were treated in atmosphere with composition of 6% of nitrogen, treatment time of 30 minutes and temperature of 390°C, when compared with drills in delivery conditions.

**Keywords:** nitriding, drilling, drills, high speed steel, life cycles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Brocas helicoidais com revestimento de nitreto de titânio	17
Figura 2 – Desgaste em brocas helicoidais	18
Figura 3 – Desgaste do flanco	18
Figura 4 – Ilustração do reator de Nitretação a Plasma	20
Figura 5 – Ilustração da Camada Nitretada	22
Figura 6 – Curva Tempo de Nitretação x Percentual de Nitrogênio na atmosfera	23
Figura 7 – Ilustração do efeito de borda	24
Figura 8 – Bloco para usinagem (medidas em mm)	26
Figura 9 – Reator de Nitretação a plasma	28
Figura 10 – Suporte para as peças de nitretação	29
Figura 11 – Parâmetros de controle	29
Figura 12 – Processo de nitretação	30
Figura 13 – Centro de usinagem DOOSAN modelo DNM400	30
Figura 14 – Visor que indica os parâmetros de usinagem	31
Figura 15 – Atuação do fluído refrigerante	32
Figura 16 – Posicionamento das furações	33
Figura 17 – Não formação de cavaco contínuo	38
Figura 18 – Broca Grupo 1 ampliação 100x	39
Figura 19 – Grupo 1 ampliação 500x	39
Figura 20 – Grupo 2 ampliação 200x	40
Figura 21 – Grupo 2 ampliação 500x	40
Figura 22 – Grupo 3 ampliação 200x	41
Figura 23 – Grupo 3 ampliação 500x	41
Figura 24 – Grupo 4 ampliação 200x	42
Figura 25 – Grupo 4 ampliação 500x	42

Figura 26 – Grupo 5 ampliação 200x	43
Figura 27 – Grupo 5 ampliação 500x	43
Figura 28 – Efeito de borda	44
Figura 29 – Perfis para medição de dureza	45
Figura 30 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 1.	46
Figura 31 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 2.	46
Figura 32 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 3.	46
Figura 33 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 4.	47
Figura 34 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 5.	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de aços rápidos	15
Tabela 2 – Especificações das Brocas	25
Tabela 3 – Distribuição dos grupos conforme os tempos de nitretação.	27
Tabela 4 – Distribuição dos grupos conforme os tempos de nitretação.	27
Tabela 5 – Profundidades de corte utilizadas	31
Tabela 6 – Parâmetros dos furos de centro executados	32
Tabela 7 – Parâmetros dos furos	33
Tabela 8 – Contagem das furações	36
Tabela 9 – Contagem das furações	37
Tabela 10 – Espessuras de camadas nitretadas das amostras	44

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1    Objetivos	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1    Aço rápido M2	15
2.2    Processo de furação	16
2.2.1    Brocas	16
2.2.2    Avaliação da vida útil de brocas	17
2.3    Processo de Nitretação	19
2.4    Processo de Nitretação a Plasma	19
2.5    Microestrutura dos aços nitretados	21
2.6    Efeito de Borda	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
3.1    Materiais	25
3.2    Tratamento de nitretação a plasma	26
3.3    Usinagem	30
3.4    Análises Metalográficas e de Perfil de Dureza	34
<b>4 Resultados</b>	<b>36</b>
4.1    Análise da vida útil em ciclos de furações	36
4.2    Análise da usinabilidade	37
4.3    Análise metalográfica	38
4.4    Microdureza	45
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho são abordados os temas Brocas Helicoidais, Usinagem, Furação e Nitretação a Plasma. Com base nesses conceitos, foram realizadas avaliações da influência do tratamento de nitretação na durabilidade e na dureza de brocas.

As brocas helicoidais de diâmetros inferiores a 1,20 mm apresentam baixos tempos de vida útil em processos de manufatura. Estas condições desfavorecem a execução de procedimentos para melhora da produtividade de uma unidade de produção. As ocorrências de quebra da ferramenta no momento de usinagem podem muitas vezes tornar o procedimento inviável.

O processo de nitretação a plasma se torna cada vez mais atrativo para melhorias em diversas características dos materiais. Sendo que os avanços neste processo promoveram uma ampliação tanto da gama de materiais, quanto dos tipos específicos de tratamentos, que são definidos pela posterior aplicação do material tratado.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma análise comparativa da vida útil de brocas de aço rápido M2 de pequeno diâmetro submetido ao tratamento de nitretação a plasma e de brocas sem tratamento. Sendo assim, podem-se estabelecer os seguintes objetivos específicos:

- Realizar furações com brocas de aço rápido de pequeno diâmetro, com e sem tratamento, em condições industriais de processo;
- Comparar a vida útil de brocas nitretadas em diferentes condições, em termos de número de furos realizados, com a vida útil de brocas não nitretadas;
- Avaliar as características da camada nitretada em relação à espessura, dureza, uniformidade, e presença ou não da camada de compostos;
- Avaliar os modos de falhas das brocas em condições de serviço;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Aço rápido M2

O aço rápido M2 é um dos aços mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte para processos de furação. O nome aço rápido vem do inglês 'High Speed Steel', ou seja, aço de altas velocidades (CHIAVERINI, 1986). A tabela 1 mostra os tipos de aço rápido disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 1 – Tabela de aços rápidos

Composição dos Aços Rápidos - Classes M e T										
Designação		Composição % (*)								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
Aços rápidos com Molibdênio										
M1	T11301	0,78-0,88	0,15-0,40	0,20-0,50	3,50-4,00	0,30 máx	8,20-9,20	1,40-2,10	1,00-1,35	...
M2	T11302	0,78-0,88; 0,095-1,05	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	...
M4	T11304	1,25-1,40	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,75	0,30 máx	4,25-5,50	5,25-6,50	3,75-4,50	...
M35	T11335	0,82-0,88	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	4,50-5,50
M42	T11342	1,05-1,15	0,15-0,40	0,15-0,65	3,50-4,25	0,30 máx	9,00-10,00	1,15-1,85	0,95-1,35	7,75-8,75
M62	T11362	1,25-1,35	0,15-0,40	0,15-0,40	3,50-4,00	0,30 máx	10,00-11,00	5,75-6,50	1,80-2,10	...
Aços rápidos com Tungstênio										
T1	T12001	0,65-0,80	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	...	17,25-18,75	0,90-1,30	...
T15	T12015	1,50-1,60	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-5,00	0,30 máx	1,00 máx	11,75-13,00	4,50-5,25	4,75-5,25

(\*) todos os aços contém 0,25 máx Cu, 0,03 máx P, e 0,03 máx S. O enxofre pode ser aumentado para 0,06 a 0,15% para melhorar a usinabilidade dos grupos M e T.

Fonte: <http://www.cimm.com.br>

Devido à sua composição, o M2 é amplamente utilizado para ferramentas de desbaste e de acabamento em processos de usinagem de metais, com boa retenção de corte e excelente tenacidade (VILLARES, 2003).

São inúmeras as aplicações desse aço: ferramentas de torneiar, aplainar, mandrilar, furar, alargar e de fresar. Também se aplica a machos, brochas, mandris, facas circulares (VILLARES, 2003).

## **2.2 Processo de furação**

O processo de furação tem por objetivo a geração de furos em um determinado material através do movimento de rotação entre a peça e a ferramenta. A remoção do material é garantida pelo movimento relativo de avanço, que ocorre segundo uma trajetória coincidente ou paralela ao eixo longitudinal da ferramenta.

Esse processo é usado na maioria das indústrias manufatureiras ao redor do mundo, o que mostra a relevância das pesquisas e avanços nesse tema. Melhorias nessa área podem favorecer diversas etapas na produção de peças em geral.

Na furação, torna-se necessário levar em consideração vários parâmetros, tais como diâmetro do furo, tolerâncias e profundidade. A furação é feita geralmente em condições severas, das quais se pode citar: variação da velocidade de corte; dificuldade de lubrificação do gume da ferramenta; dificuldade da remoção do cavaco; dificuldade no controle de temperatura (STEMMER, 1992).

Devido as tolerâncias geométricas específicas exigidas em cada projeto, segundo Stemmer (1992), “operações subsequentes são necessárias para dar ao furo as desejadas características operacionais”. Operações como mandrilamento, torneamento, brochamento, alargamento e lapidação são as mais utilizadas em diversos sistemas de usinagem. Atualmente, com avanços na tecnologia das máquinas de usinagem, esses processos não são usuais, porém diversas indústrias ainda utilizam o maquinário que necessita de alguma operação subsequente para atender as especificações dos clientes.

### **2.2.1 Brocas**

As ferramentas aplicadas no processo de furação são denominadas brocas. Existem vários tipos de brocas: chatas, canhão, ocas e as mais utilizadas na indústria são as chamadas helicoidais (Figura 1), as quais são capazes de realizar furações de 0,1 mm a 100 mm de diâmetro (ETERNAL TOOLS, 2015).

Os materiais empregados para a fabricação de brocas helicoidais, em geral, são da classe dos aços rápidos, havendo brocas inteiriças de metal duro e com



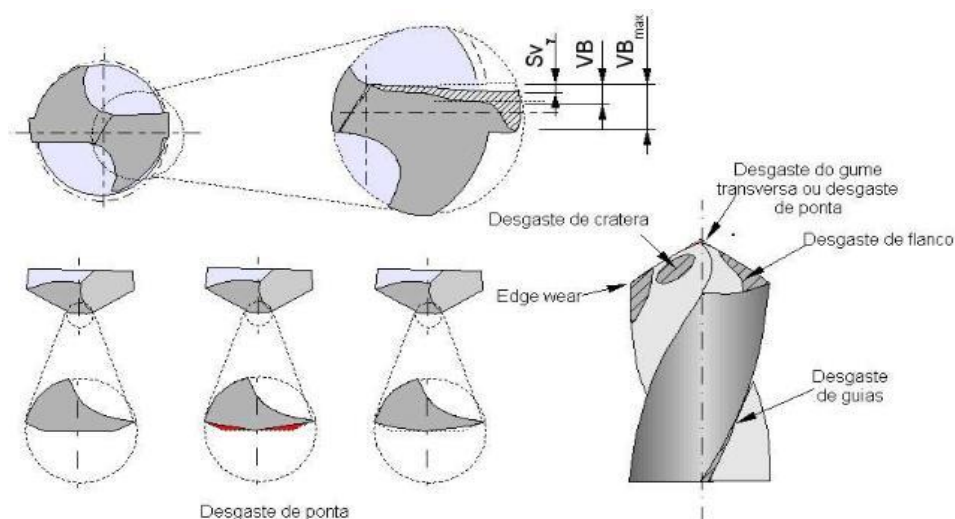
revestimentos. Existem inúmeros revestimentos que são aplicados nessas ferramentas, entre eles: revestimento a vapor (PVD); acabamento com bronze; nitretação; revestimento com camada de cromo duro; revestimento de nitreto de titânio (TiN); revestimento de carbonitreto de titânio (TiCN); revestimento de nitreto de titânio-alumínio (Ti-AlN); revestimento de TiAlN-X; revestimento de nitreto de cromo (CrN); revestimento de nitreto de zircônio (ZrN); revestimento de diamante (CJMM, 2015).



**Figura 1 – Brocas helicoidais com revestimento de nitreto de titânio**  
Fonte: Adaptado de IRWIN, 2014.

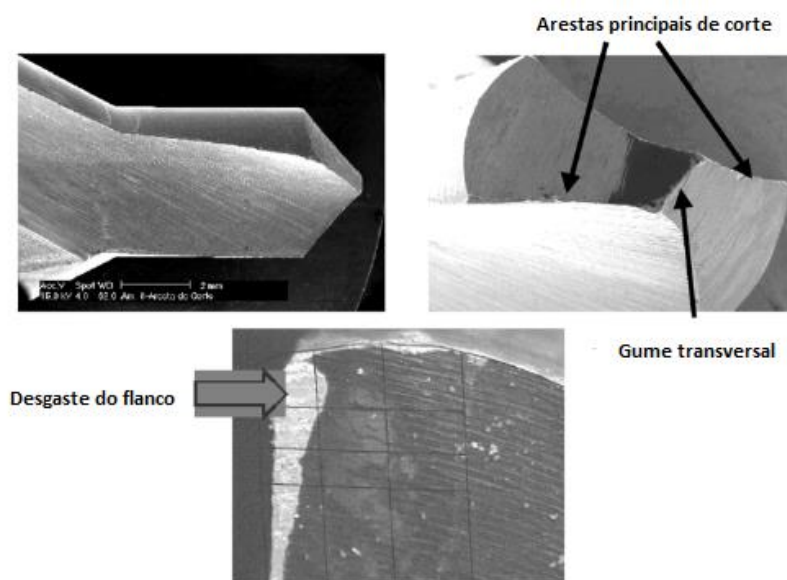
### 2.2.2 Avaliação da vida útil de brocas

Brocas e diversas outras ferramentas de corte estão sujeitas a um processo de desgaste. Os principais tipos de desgaste são de gume, flanco, guias e cratera, conforme mostrado na figura 2 (STOETERAU, 2011).



**Figura 2 – Desgaste em brocas helicoidais**  
**Fonte: Adaptado de STOETERAU, 2011**

Existem muitos métodos para a avaliação do desgaste de uma ferramenta, levando em consideração avanços no desgaste do gume, guia, ponta e flanco da ferramenta. Em grande parte dos casos, pode-se monitorar a variação da geometria do flanco de corte, ou seja, após submeter à ferramenta a um ciclo de furações, visualiza-se, com ajuda de um microscópio ótico, o avanço do desgaste aplicado ao flanco de corte (Figura 3).



**Figura 3 – Desgaste do flanco**  
**Fonte: Adaptado de ROCHA, 2002**

Segundo a norma ISO 3685 o desgaste de uma ferramenta se aplica nas dimensões do flanco de corte. Conforme citação da norma sabe-se que deve ser considerada a ferramenta desgastada e avaliar o valor da espessura média de desgaste do flanco (chamada de VB), sendo que essa espessura possui um valor limite, o qual, se ultrapassado, torna a ferramenta desgastada (KWIETNIEWSKI, 2004).

### **2.3 Processo de Nitretação**

A Nitretação consiste em um método de difusão termoquímica do nitrogênio nascente sobre a superfície de aços (PYE, 2003). Classificado como um processo de tratamento de superfície, a nitretação altera a composição superficial de metais. Fazendo um comparativo com o tratamento de cementação, na nitretação o tratamento térmico de têmpera posterior é dispensado, devido à elevada dureza final atingida por esse processo.

O pioneiro deste processo foi Adolph Machlet, que patenteou o método no ano de 1908, somente reconhecido 5 anos depois. Porém, a primeira nitretação gasosa feita da forma como se conhece hoje foi executada por Adolph Fry no ano de 1921, descrevendo o processo como uma forma de endurecimento superficial a temperaturas próximas a 580° C (PYE, 2003).

A indústria utiliza prioritariamente os processos de nitretação em banho de sais (ou nitretação líquida) e a nitretação gasosa (com atmosfera de amônia). E com o crescente avanço tecnológico nesta área, a nitretação a plasma vem sendo cada vez mais requerida pelos fabricantes, devido à elevada qualidade do tratamento comparada aos demais processos. (MIGUEL, 2010).

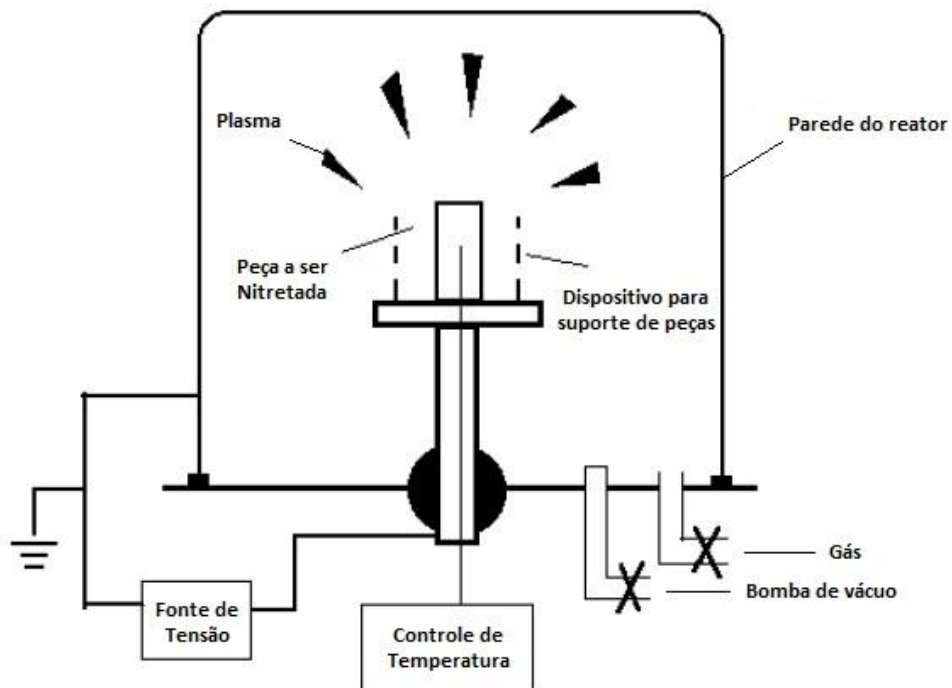
Diversos benefícios são obtidos no material submetido ao processo de nitretação, tais como aumento na resistência à fadiga, maior resistência ao desgaste, resistência à corrosão, aumento de dureza superficial, entre outros (PYE, 2003).

### **2.4 Processo de Nitretação a Plasma**

Desenvolvido na década de 1930 pelo físico alemão Dr. Wehnheldt, e pelo físico suíço Dr. Bernhard Berghaus, o processo de nitretação a plasma ganhou aceitação industrial somente na década de 1970, acompanhado de grandes desenvolvimentos na área de eletrônica (PYE, 2003).

O tratamento é feito da seguinte forma: em uma câmara hermeticamente fechada (que funciona como o ânodo da reação) tem-se um dispositivo de suporte (que funciona como o cátodo da reação) no qual as peças são colocadas. O dispositivo é isolado da câmara e de outros componentes (ALVES JR, 2001).

Essa câmara está submetida a uma condição controlada de temperatura, além de uma mistura gasosa contendo nitrogênio (e outros gases, que variam com a aplicação), baixa pressão (valores próximos a 0,01 torr) e a uma diferença de potencial. Combinando esses fatores, é possível gerar o plasma, que cobre completamente a superfície das peças (ALVES JR, 2001). Na figura 4 pode-se observar o desenho esquemático de um reator de nitretação a plasma.



**Figura 4 – Ilustração do reator de Nitretação a Plasma**

**Fonte: Adaptado de ALVES JR, (2001).**

O sistema é composto por um reator, totalmente vedado, que trabalha em conjunto com uma fonte de potência e um sistema de bombeamento de vácuo. No equipamento também existem entradas para componentes como termopares, fluxímetros (para controle de gás) e válvulas (para estabilidade da pressão).

Atualmente, são dois os tipos mais usuais de reatores para o processo de nitretação a plasma, cuja principal diferença entre eles é o modo de aquecimento das peças, os quais são:

- Reator de parede fria, que utiliza a própria energia do plasma para aquecimento da peça a ser nitretada;
- Reator de parede quente, que além da energia do plasma, utiliza energia proveniente de uma fonte externa (por meio de resistências elétricas, por exemplo) para aquecimento das peças.

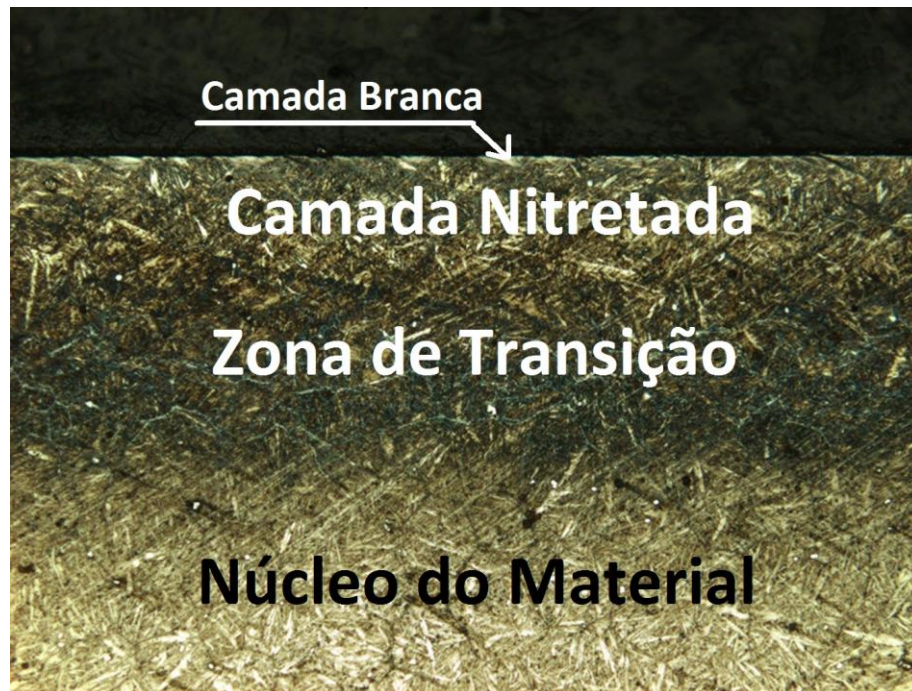
Uma das vantagens da utilização de reatores de parede quente é o melhor controle de temperatura dentro da câmara de nitretação. Nos reatores de parede fria, o controle de temperatura se dá somente com a distribuição da carga de peças que são submetidas à energia do plasma. Caso essa distribuição não seja uniforme ou as peças possuam diferentes geometrias, poderão existir diferenças de temperatura nas regiões da câmara do reator (VILLANOVA, 2014).

Os principais diferenciais do tratamento de nitretação a plasma, quando comparado aos demais tratamentos de nitretação são um melhor controle da camada nitretada, baixo tempo de tratamento, uniformidade na espessura da camada, baixo custo energético, menores temperaturas de tratamento e reduzido impacto ambiental (ALVES JR, 2001).

## **2.5 Microestrutura dos aços nitretados**

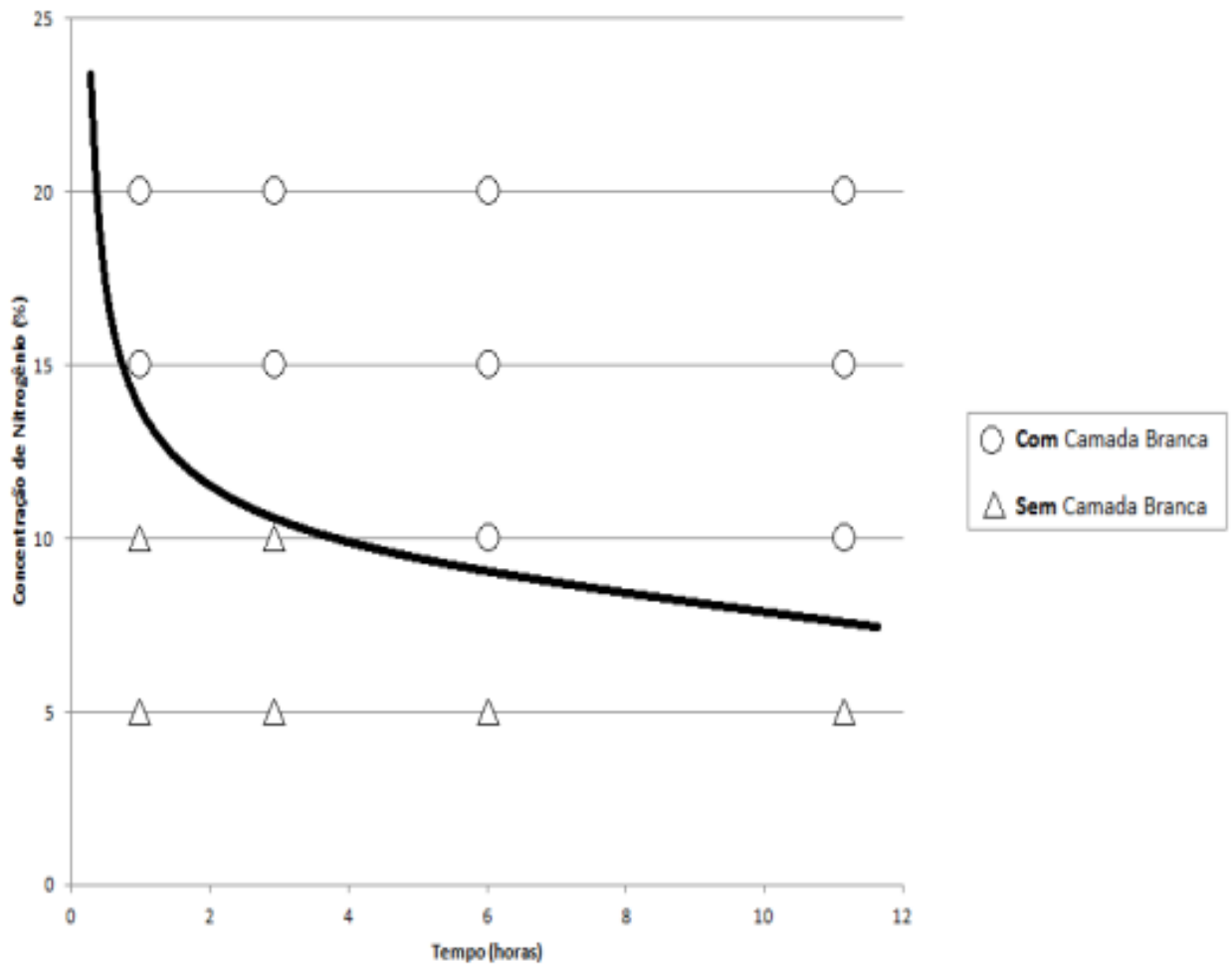
A camada mais externa formada na nitretação é denominada camada branca ou camada de compostos, caracterizada por elevada dureza e fragilidade, devido à presença de nitretos de ferro que não se difundem para o interior do material, os promovendo essa característica quebradiça da camada. A camada de compostos tem relação com as tensões compressivas do material, oferecendo boa resistência à corrosão e a abrasão, de acordo com a estabilidade dos nitretos formados (PYE, 2003). Em casos extremos de ferramentas de aço rápido, a formação dessa camada pode levar à quebra antes do esperado para vida útil, comprometendo o resultado da peça. É possível controlar a espessura dessa camada com um ajuste adequado de parâmetros como tempo, temperatura e composição do gás da atmosfera do reator (PREIZNER, 2012).

Após a região da camada branca, há a formação da chamada “zona de difusão”, composta por nitretos estáveis originados pela reação do nitrogênio com os elementos do material a ser tratado. Logo abaixo dessa região está o núcleo da peça (PYE, 2003). A figura 5 mostra as camadas formadas depois de realizado o processo de nitretação a plasma.



**Figura 5 – Ilustração da Camada Nitretada**  
**Fonte: Adaptado de PREIZNER, Isaac Matos, (2012).**

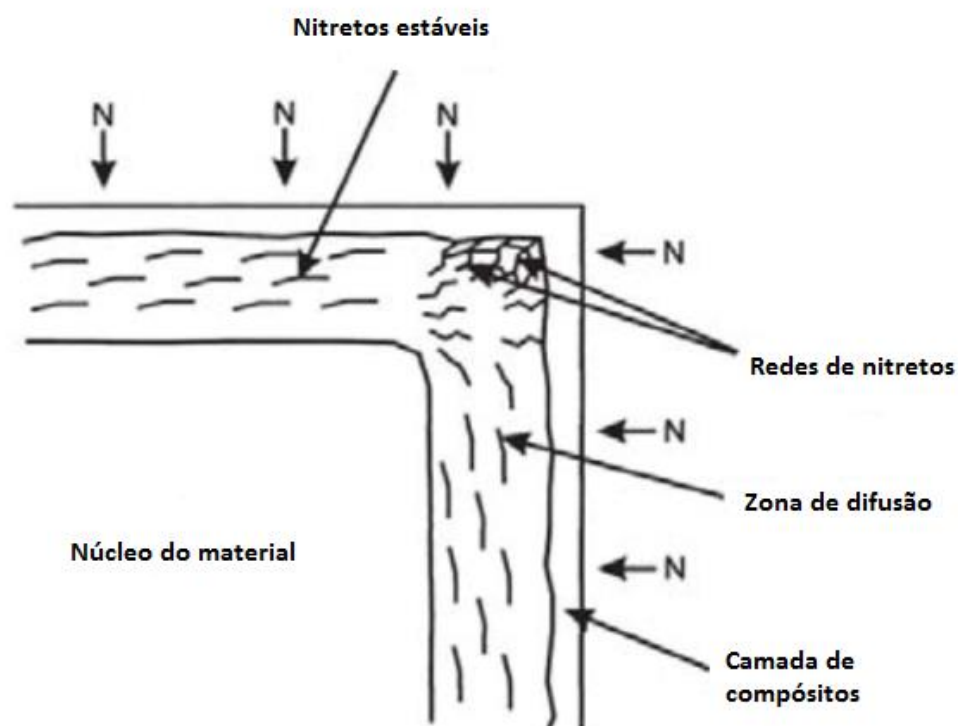
Segundo Preizner (2012) pode-se variar os parâmetros de tempo e concentração de nitrogênio para ter o controle da formação da camada branca. A figura 6 demonstra um gráfico das atmosferas de nitrogênio relacionadas com o tempo de nitretação, revelando quais delas formam ou não a referida camada no processo realizado a 550°C e pressão de 2 torr.



**Figura 6 – Curva Tempo de Nitretação x Percentual de Nitrogênio na atmosfera**  
 Fonte: Adaptado de PREIZNER, Isaac Matos, (2012).

## 2.6 Efeito de Borda

Segundo Pye (2003) “o efeito de borda é um fenômeno que ocorre em alguns tipos de difusão em processos de tratamento térmico, incluído o processo de nitretação a plasma”. Regiões de ângulos agudos (como mostra a figura 7) recebem nitrogênio vindo de todos os ângulos, isso faz com que ocorra uma maior saturação de nitrogênio na região comparada a demais regiões da peça, conseqüentemente tendo uma espessura de camada, dureza e fragilidade maiores.



**Figura 7 – Ilustração do efeito de borda**  
Fonte: Adaptado de Pye (2003, p.80).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para execução da avaliação, optou-se por selecionar brocas com valores de diâmetro inferiores a 1,20 mm, constituídas do material ABNT NBR 6189 Tipo M2 do fabricante IZAR, fornecidas como doação pela empresa Support Ferramentas de Usinagem. A quantidade e o tipo das brocas estão demonstrados na tabela 2. Foram também adquiridas duas unidades de brocas helicoidais com diâmetro de 5 mm do mesmo material, utilizadas como amostras para posteriores análises microscópicas.

**Tabela 2 – Especificações das Brocas**

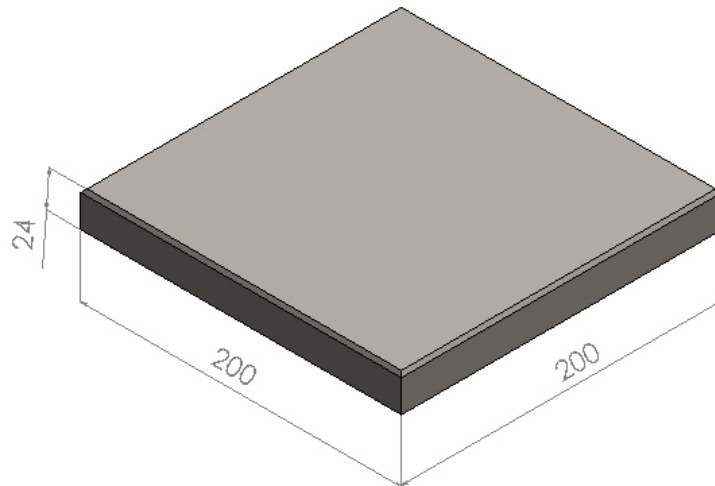
<b>Brocas Helicoidais</b>	<b>Diâmetro (d)</b>	<b>Comprimento (L)</b>	<b>Profundidade da broca (w)</b>
12 unidades	0,8 mm	30 mm	10 mm
12 unidades	1 mm	34 mm	12 mm
12 unidades	1,2 mm	38 mm	16 mm
2 unidades	5 mm	86 mm	52 mm



**Fonte: Autoria própria.**

Devido aos resultados obtidos durante a execução dos testes de furação (como descrito no capítulo 4: Análise de Resultados), foi selecionado um novo conjunto de 6 brocas de 1,0 mm de diâmetro, do mesmo lote de ferramentas. Neste lote, foram aplicados diferentes processos de nitretação, cujos parâmetros são detalhados mais adiante no trabalho.

Para os testes de furação, foram utilizados como metal de base dois blocos de aço ABNT 1045 com dureza de 185 HV. A geometria do material é mostrada na figura 8 e as matérias primas foram fornecidas como doação pela empresa Aços Favorit Distribuidora.



**Figura 8 – Bloco para usinagem (medidas em mm)**

**Fonte: Autoria própria.**

### **3.2 Tratamento de nitretação a plasma**

As brocas de menores diâmetros foram divididas em quatro grupos, cada um contendo nove unidades: três brocas de 0,8 mm de diâmetro; três brocas de 1,0 mm de diâmetro e três brocas de diâmetro 1,2 mm. O processo de nitretação foi realizado em três grupos de amostras, e o quarto grupo permaneceu em estado de fornecimento, sendo utilizado como parâmetro de referência do processo de usinagem.

Os parâmetros do processo de nitretação são mostrados na tabela 3. As duas brocas de maior diâmetro (5 mm) foram cortadas em quatro pares de amostras. Cada par é formado por uma amostra provida da haste e outra da hélice da ferramenta. Esses pares de amostras foram incluídos unitariamente em cada grupo e nitretados conjuntamente nos demais grupos, tendo como finalidade seu uso para a realização dos perfis de dureza das camadas.

**Tabela 3 – Distribuição dos grupos conforme os tempos de nitretação.**

	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>
<b>Temperatura</b>	450° C	450° C	450° C
<b>Tempo</b>	150 min	105 min	45 min
<b>Atmosfera</b>	6% N <sub>2</sub>	6% N <sub>2</sub>	6% N <sub>2</sub>
	94% H <sub>2</sub>	94% H <sub>2</sub>	94% H <sub>2</sub>
<b>Pressão</b>	2 a 2,5 torr	2 a 2,5 torr	2 a 2,5 torr

**Fonte: Autoria própria.**

Em decorrência dos resultados obtidos nos testes de furação com as amostras dos grupos 1, 2 e 3, os quais serão discutidos no próximo capítulo, optou-se por submeter o novo conjunto de brocas ao tratamento demonstrado na tabela 4. O conjunto de ferramentas foi dividido em outros dois grupos, cada um composto por três brocas de diâmetro 1,0 mm.

**Tabela 4 – Distribuição dos grupos conforme os tempos de nitretação.**

	<b>Grupo 4</b>	<b>Grupo 5</b>
<b>Temperatura</b>	450° C	390° C
<b>Tempo</b>	20 min	30 min
<b>Atmosfera</b>	6% N <sub>2</sub>	6% N <sub>2</sub>
	94% H <sub>2</sub>	94% H <sub>2</sub>
<b>Pressão</b>	2 a 2,5 torr	2 a 2,5 torr

**Fonte: Autoria própria.**

A composição das atmosferas utilizadas neste trabalho foi definida com base em PREIZNER, (2012) para a não ocorrência da formação da camada de compostos na superfície do material.

O controle do fluxo de gases foi programado com a utilização de fluxímetros da marca MKS Instruments. No primeiro instrumento foi calibrado o fluxo de 470 sccm (centímetro cúbico por minuto) de hidrogênio e no segundo fluxímetro em 30 sccm de nitrogênio totalizando 500 sccm de gases, ou seja, 94% de hidrogênio e 6% de nitrogênio.

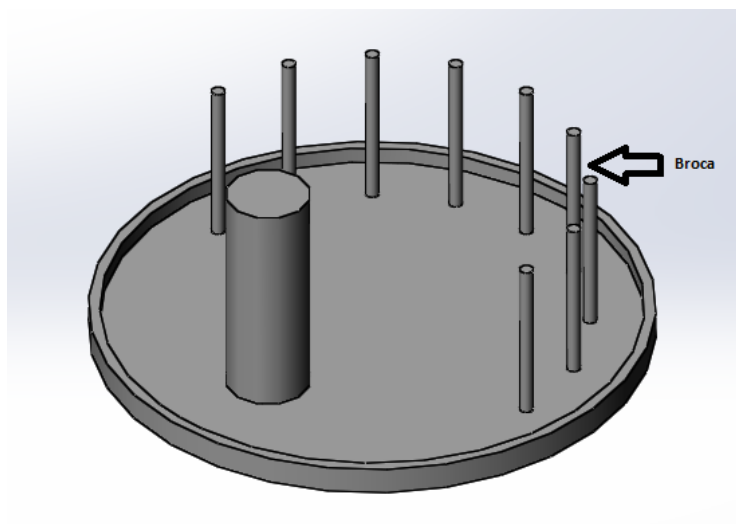
O reator utilizado nos processos de nitretação realizados no presente trabalho foi o de modelo THOR NP 600, fabricado pela empresa SDS Plasma (figura 8).



**Figura 9 – Reator de Nitretação a plasma**  
**Fonte: Autoria própria.**

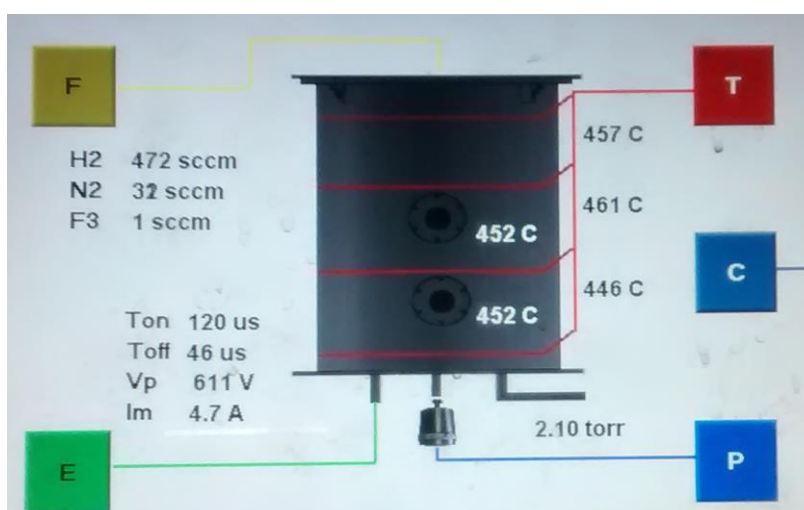
Este equipamento trabalha com uma parede de aquecimento auxiliar denominada “parede quente”. Para os grupos de 1 a 4 foi fixada a temperatura de tratamento em 450°C (ROCHA, 1999).

As brocas foram posicionadas verticalmente em dispositivos, com dois medidores de temperatura em corpos de aço próximos as amostras (figura 10). Os corpos de aço são cilíndricos possuindo diâmetro de 25 mm e altura de 50 mm com massa de aproximadamente 195 g.



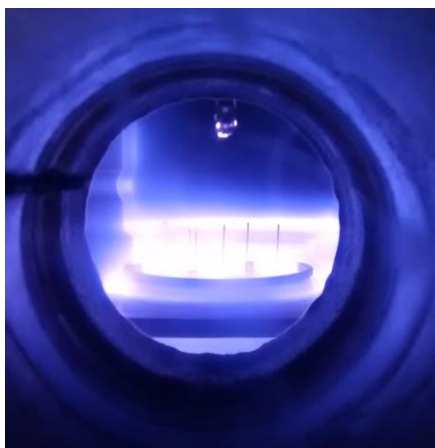
**Figura 10 – Suporte para as peças de nitretação**  
**Fonte: Autoria própria.**

O tempo para o início do processo até a estabilização da temperatura foi de aproximadamente 2 horas, devido às dimensões do reator. O painel de controle do reator de nitretação a plasma está demonstrado na figura 11. É possível visualizar os parâmetros ajustados no processo como fluxo de gases, temperatura das cargas, temperatura da parede, pressão e tensão da fonte pulsada.



**Figura 11 – Parâmetros de controle**  
**Fonte: Autoria própria.**

Depois de alcançado o valor da temperatura desejada, deu-se início ao tratamento de nitretação como mostrado na figura 12. Esse procedimento foi realizado em todos os grupos de amostras que foram nitretados.



**Figura 12 – Processo de nitretação**

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Usinagem

Com a finalidade de obtenção de parâmetros confiáveis, para o comparativo da avaliação da vida útil da ferramenta, o procedimento de furação foi realizado em um centro de usinagem por Comando Numérico Computadorizado (CNC).

A empresa TOZ Soluções Industriais forneceu todo suporte para a realização dos testes. A figura 13 ilustra o centro de usinagem do fabricante DOOSAN modelo DNM 400 que foi utilizado para executar os furos e a preparação da matéria prima.



**Figura 13 – Centro de usinagem DOOSAN modelo DNM400**

Fonte: Autoria própria.

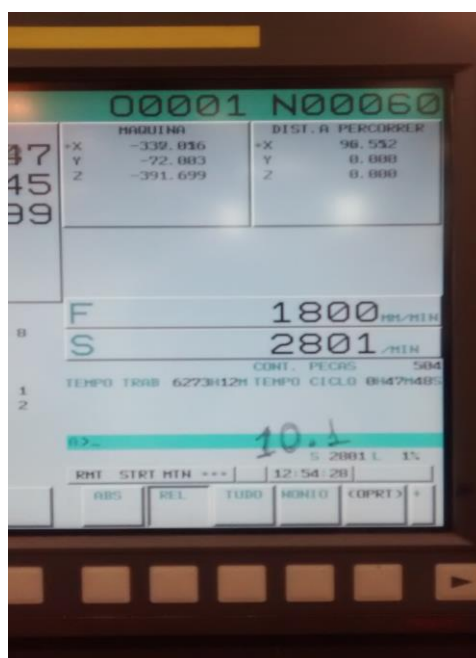
Os parâmetros de usinagem foram pré-programados segundo especificações de procedimentos da empresa TOZ Soluções Industriais. A tabela 5 mostra as profundidades de corte procedidas em cada diâmetro de broca, as quais foram definidas em conjunto com a equipe da TOZ, como sendo seis vezes o diâmetro das brocas.

**Tabela 5 – Profundidades de corte utilizadas**

Brocas Helicoidais	Diâmetro	Profundidade de corte
	0,8 mm	4,8 mm
1 mm	6 mm	
1,2 mm	7,2 mm	

Fonte: autoria própria.

O centro de usinagem com CNC permite uma alta confiabilidade nos resultados, pois possui parâmetros constantes como velocidade de avanço e rotação, conforme mostra a Figura 14.



**Figura 14 – Visor que indica os parâmetros de usinagem**

Fonte: Autoria própria.

As furações foram executadas com a presença de fluido de corte, como mostrado na figura 15. A utilização do fluido ajuda a diminuir a temperatura da ferramenta e também no desprendimento do cavaco.



**Figura 15 – Atuação do fluido refrigerante**  
**Fonte: Autoria própria.**

Inicialmente foram realizados furos de centro no material, cujos parâmetros de usinagem estão ilustrados na tabela 6. Tal procedimento ajuda a manter a broca alinhada para a execução das furações e auxilia na diminuição do risco da quebra da ferramenta por trepidação, nos instantes iniciais da furação. Foram realizados um total de 1444 furos em cada face do bloco de usinagem.

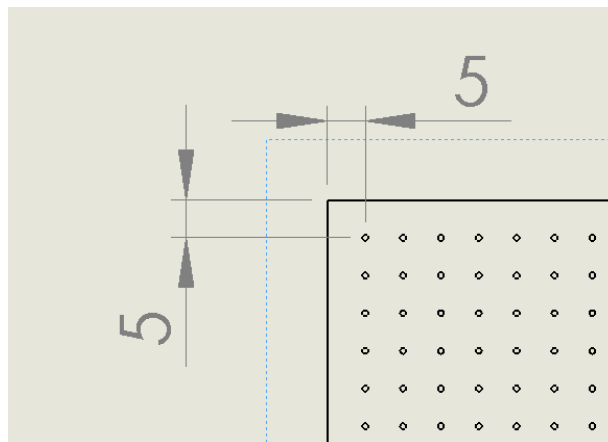
**Tabela 6 – Parâmetros dos furos de centro executados**

<b>Furos de Centro</b>		
Diâmetro	0,5	mm
Rotação	6000	rpm
Avanço de Corte	200	mm/min
Avanço de Mergulho	2000	mm/min
Avanço Rasante	1000	mm/min
Número de Furos por Face	1444	furos
Tempo de Furação	38	min
Profundidade de Corte	0,5	mm

**Fonte: autoria própria**



As posições dos furos foram determinadas com base na Figura 16, espaçados de 5 mm, tanto verticalmente quanto horizontalmente, distribuídos em toda a superfície do bloco.



**Figura 16 – Posicionamento das furações**

Fonte: Autoria própria.

Depois de concluída a etapa de furação de centro, iniciou-se o processo de furação utilizando as ferramentas de corte tratadas. Os parâmetros de usinagem utilizados nos testes estão apresentados na tabela 7. O procedimento de furação foi realizado sem interrupção até a quebra da ferramenta. Inicialmente foram feitas as furações com as brocas de diâmetro 0,8 mm, na sequência dos grupos 1, 2 e 3, e finalizando com as ferramentas em estado de fornecimento. O procedimento foi repetido com as demais amostras, além dos grupos 4 e 5.

**Tabela 7 – Parâmetros dos furos**

		Brocas Utilizadas		
Diâmetro	mm	0,8	1	1,2
Rotação	rpm	6000	5500	5000
Avanço de Corte	mm/min	60	60	60
Avanço de Mergulho	mm/min	60	60	60
Avanço Rasante	mm/min	10000	10000	10000
Tipo de Furação	-	Pica-Pau	Pica-Pau	Pica-Pau
Incremento da Furação	mm	1	1	1

Fonte: Autoria própria.

O avanço de corte nada mais é que o avanço aplicado pela ferramenta na peça em um intervalo de tempo. Valores muito elevados podem tornar o processo crítico, com ocorrência de quebra da ferramenta e conseqüentemente ocasionando problemas no processo. (STEMMER, 1992)

O avanço de mergulho é definido como o deslocamento da furação em um intervalo de tempo. Em muitos casos, o tipo de furação mais apropriado se denomina “pica-pau”, em que a ferramenta realiza a furação em diversos estágios (incrementos), a fim de diminuir os esforços, facilitar o escoamento do cavaco e reduzir a temperatura de corte. (STEMMER, 1992)

O avanço rasante é o deslocamento que a ferramenta percorre até a correta posição no eixo vertical. A velocidade na qual ele ocorre costuma ser maior que em outros avanços, com o objetivo de reduzir o tempo do próprio processo. (STEMMER, 1992)

#### **3.4 Análises Metalográficas e de Perfil de Dureza**

Após realizadas as furações, foram efetuadas as análises metalográficas de todas as amostras da seguinte maneira:

- 1) Cortes transversais nas regiões das camadas nitretadas, tanto na parte helicoidal como na haste, com o auxílio de uma cortadeira Struers Minitom;
- 2) Embutimento a quente em baquelite com o auxílio da máquina Struers Predopress;
- 3) Lixamento utilizando, nesta ordem, lixas d'água de granulometrias 80, 220, 320, 400, 500 e 600 em uma lixadeira Struers Knuth Rotor 3;
- 4) Polimento com água e alumina 1µm em uma politriz Struers Dap-V;
- 5) Ataque das amostras com Nital 10%, para revelação da microestrutura;
- 6) Coleta das imagens realizadas com o software Image ProPlus e com o auxílio de um microscópio óptico Olympus BX51M.

Para a avaliação da dureza da camada nitretada, as amostras das brocas de diâmetro 5 mm foram submetidas a uma análise de microdureza, com o auxílio de um microdurômetro Shimadzu HMV, a fim de traçar um perfil de dureza Vickers.

Cada uma das amostras coletadas foi avaliada no sentido da borda para o interior da seção da broca. Foram realizadas medições apenas na parte helicoidal da broca, visto que é a seção onde ocorre, de fato, a remoção de material na usinagem. O espaçamento utilizado entre cada indentação foi de 0,2 mm, atendendo plenamente à norma ASTM E384-311, que prevê uma distância mínima entre indentações de 2 vezes o valor das diagonais de cada uma delas.

Todas as análises foram realizadas no laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

## 4 RESULTADOS

No presente trabalho foram analisados o comportamento e o desempenho de ferramentas de furação submetidas a cinco diferentes tratamentos de nitretação a plasma. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, tendo sido realizada uma avaliação da vida útil em número de furações das brocas submetidas aos processos de usinagem, com suas respectivas análises metalográficas e perfis de dureza, comparando com os tratamentos que apresentaram melhorias.

### 4.1 Análise da vida útil em ciclos de furações

Os resultados dos testes de usinagem, em termos do número de furos (ciclos) realizados pelas brocas até a sua falha são mostrados na tabela 8. Também são indicados os resultados obtidos para as brocas em estado de fornecimento, isto é, sem nenhum tipo de tratamento superficial. Por questões de viabilidade, quanto ao preparo da ferramenta no centro de usinagem para a execução das furações, não foi dado sequência na realização dos testes com as brocas de 1,2mm.

**Tabela 8 – Contagem das furações**

Grupos de Tratamento	Numero de Furações Relizadas											
	D1 = 0,8 mm				D2 = 1 mm				D3 = 1,2 mm			
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Média	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Média	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Média
Grupo 1	0	1	1	<b>0,67</b>	1	0	0	<b>0,33</b>	0	x	x	<b>0,00</b>
Grupo 2	1	2	1	<b>1,33</b>	0	1	1	<b>0,67</b>	x	x	x	<b>0,00</b>
Grupo 3	2	3	1	<b>2,00</b>	4	1	3	<b>2,67</b>	x	x	x	<b>0,00</b>
Estado de fornecimento	86	75	81	<b>80,67</b>	166	148	151	<b>155,00</b>	x	x	x	<b>0,00</b>

**Fonte: Autoria própria.**

Pode ser observado que para os três grupos, não houve melhoria na vida útil da broca, ou seja, esta teve um desempenho muito inferior se comparada à ferramenta em estado de fornecimento. Tal desempenho pode ser atribuído à elevada espessura da camada nitretada, bem como a dureza obtida nos tratamentos de nitretação, que serão discutidos no tópico 4.3 deste trabalho.

A ocorrência da quebra precoce do material tornou inviável a análise do desgaste do flanco da ferramenta, que é um procedimento para avaliar a vida útil de trabalho de brocas.

Em decorrência dos resultados obtidos com os experimentos iniciais (baixo rendimento das ferramentas tratadas), optou-se por nitretar dois novos conjuntos (grupo 4 e 5) em outros parâmetros do processo de tratamento superficial. Essas novas amostras foram submetidas ao processo de furação utilizando o mesmo procedimento das ferramentas mencionadas anteriormente (grupo 1 ao 3). Os resultados obtidos com as amostras destes grupos estão apresentados na tabela 9.

**Tabela 9 – Contagem das furações**

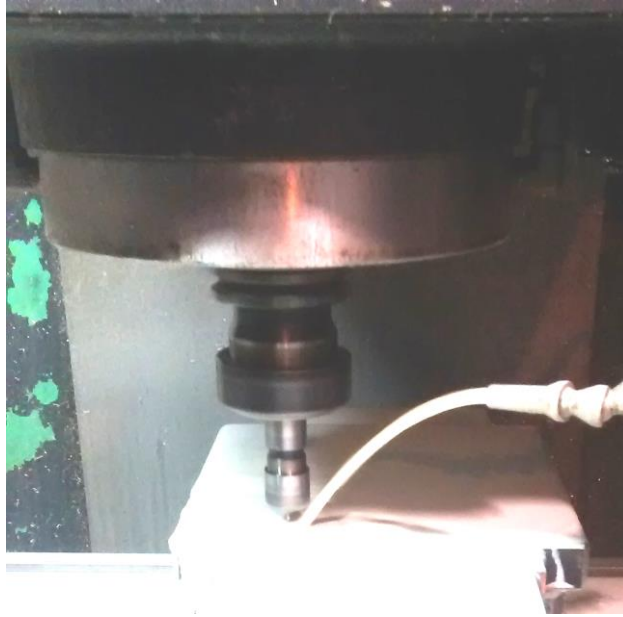
<b>Numero de Furações Relizadas</b>				
Grupos de Tratamento	D2 = 1 mm			<b>Média</b>
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	
Grupo 4	224	237	209	<b>223,33</b>
Grupo 5	268	251	239	<b>252,67</b>

**Fonte: Autoria própria.**

Os resultados mostram que, para esses dois grupos, o uso do tratamento de nitretação a plasma favorece o aumento da vida útil em número de furações realizadas pela ferramenta. A elevação deste número, para o grupo 5, foi de cerca de 63% em relação ao em estado de fornecimento, obtendo-se assim um melhor resultado quando comparado ao grupo 4, que foi de 44 %. Tais dados demonstram que alterando algumas características do tratamento, pode-se obter uma melhoria no processo.

#### **4.2 Análise da usinabilidade**

Nos testes realizados observaram-se diferenças no comportamento da usinabilidade das brocas tratadas, em comparação com as em estado de fornecimento. Conforme a figura 17, a qual mostra o momento de trabalho da ferramenta que não possui camada nitretada, pode-se observar que não existe formação de cavaco contínuo, ou seja, o cavaco formado ao percorrer o caminho da hélice quebra em menores pedaços.



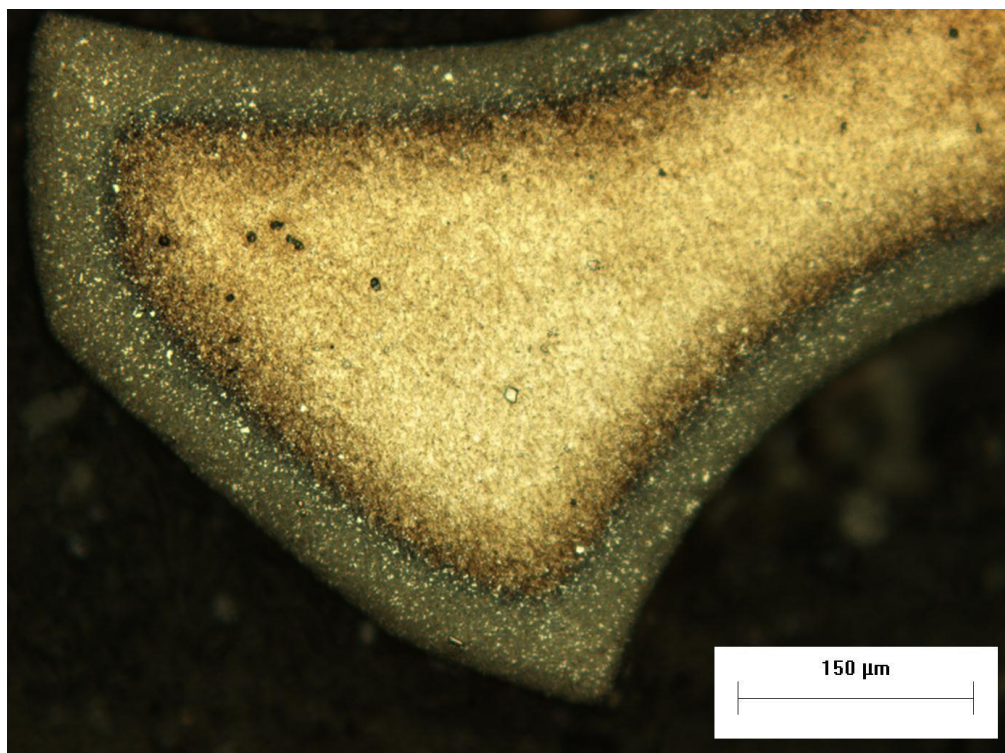
**Figura 17 – Não formação de cavaco contínuo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Já nas brocas tratadas dos grupos 4 e 5 houve formação contínua de cavaco, que ao percorrer o canal da hélice da broca não se rompeu. Esse cavaco permaneceu envolvido na altura superior da haste.

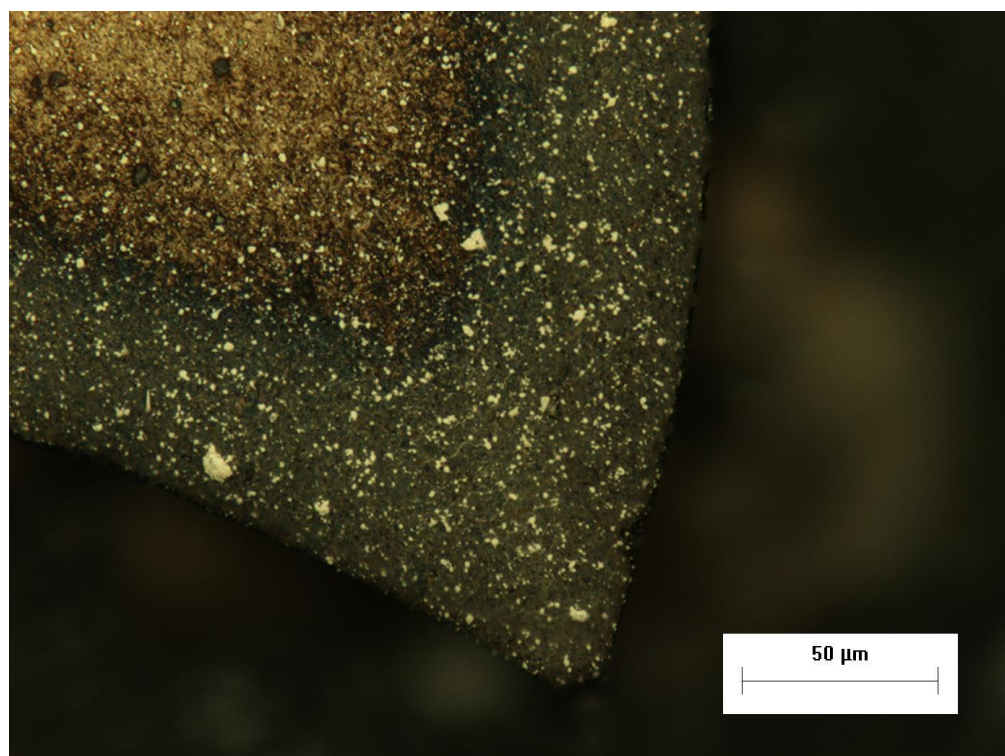
Tal variação na formação do cavaco pode ser ocasionada pela diminuição do coeficiente de atrito entre a ferramenta nitretada e o material de usinagem. Materiais nitretados possuem menor coeficiente de atrito em contato com outros materiais, e esta característica pode facilitar o escoamento do cavaco nos canais da broca, podendo ocasionar um melhor controle de temperatura da ferramenta no momento de usinagem.

### **4.3 Análise metalográfica**

Os cinco grupos de amostras foram analisados microscopicamente com o objetivo de visualizar as diferenças provocadas pelos tratamentos. A principal característica visualizada nas amostras dos grupos 1 ao 4 foi a espessura da camada de compostos formada pela nitretação e a não formação da camada branca. Na sequência, estão apresentadas as figuras 18 a 27 que representam os tratamentos.

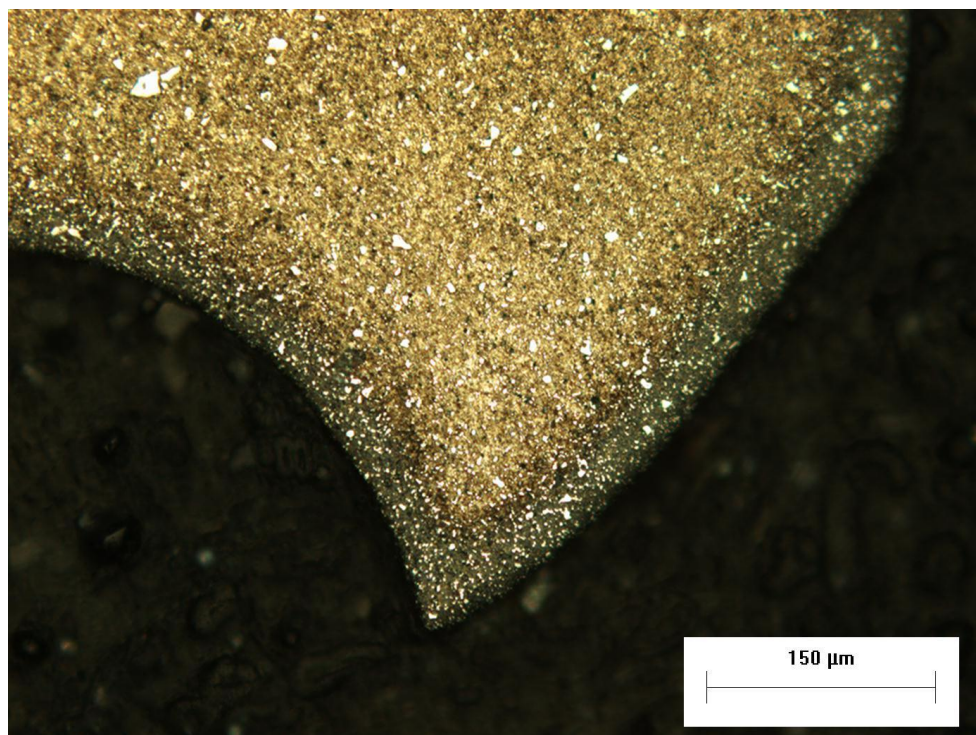


**Figura 18 – Broca Grupo 1 ampliação 100x**  
Fonte: Autoria própria.

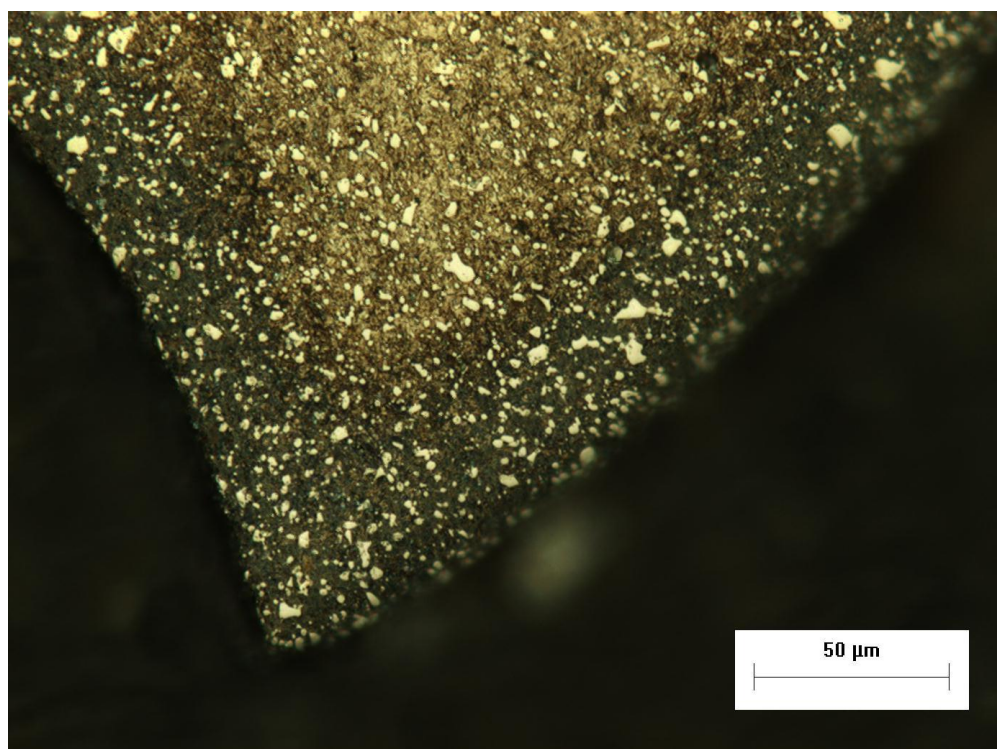


**Figura 19 – Grupo 1 ampliação 500x**  
Fonte: Autoria própria.



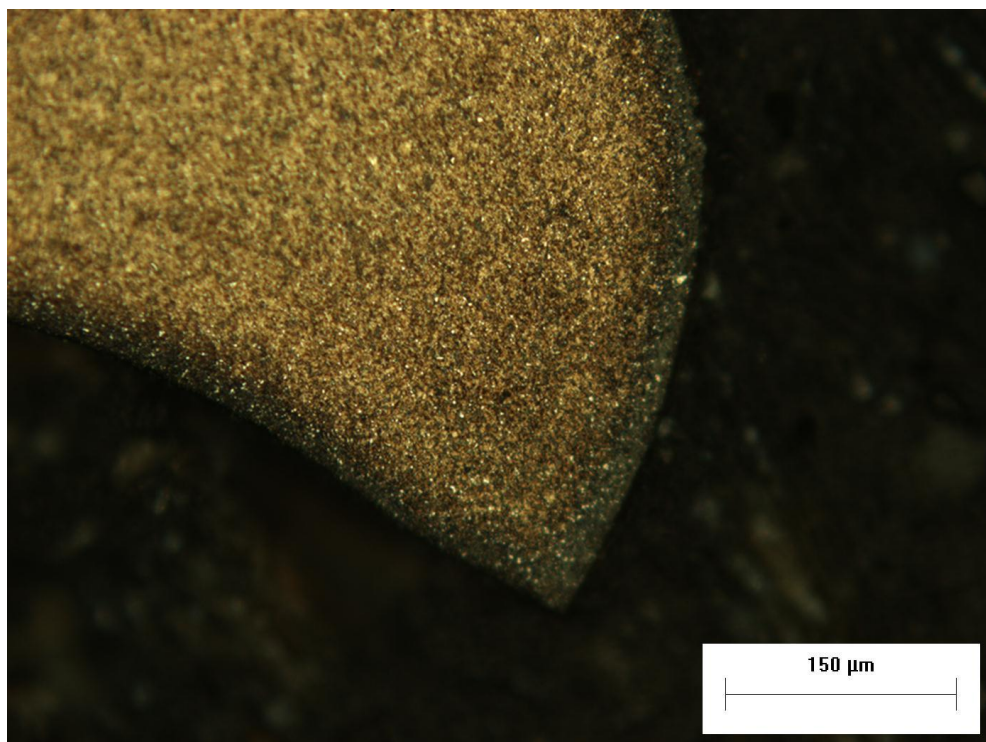


**Figura 20 – Grupo 2 ampliação 200x**  
Fonte: Autoria própria.

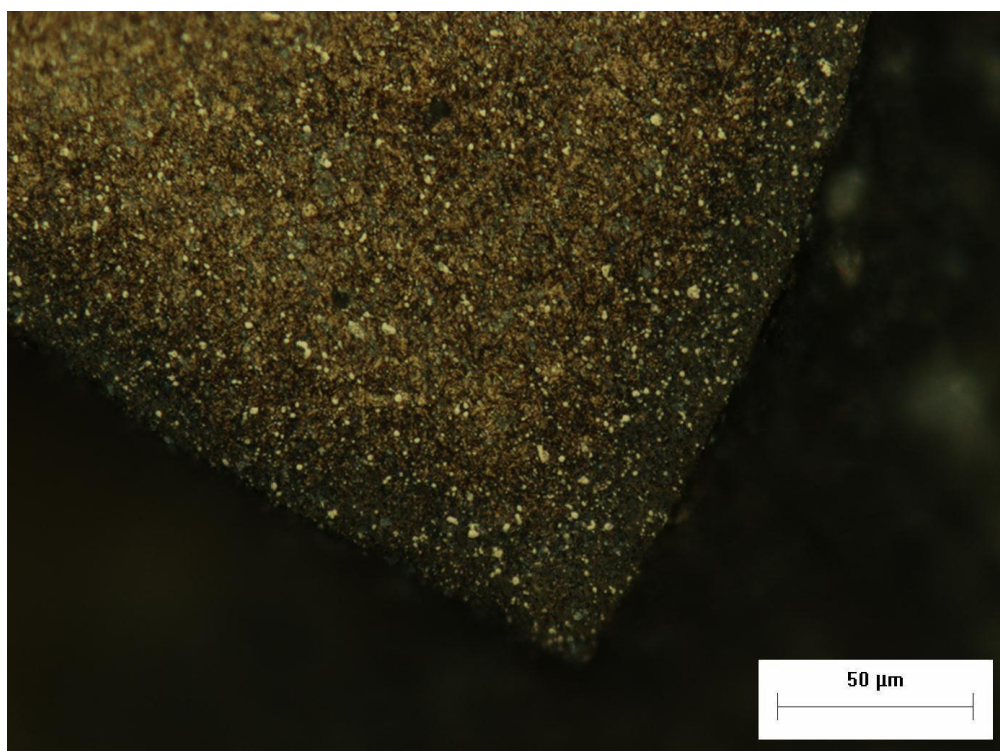


**Figura 21 – Grupo 2 ampliação 500x**  
Fonte: Autoria própria.

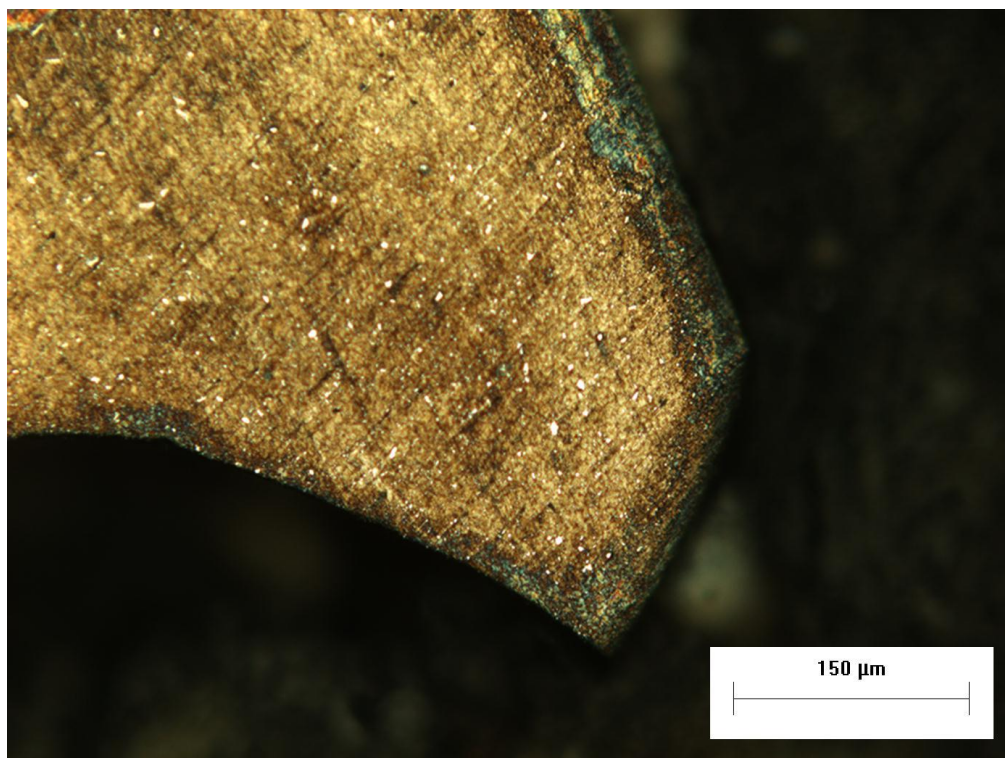




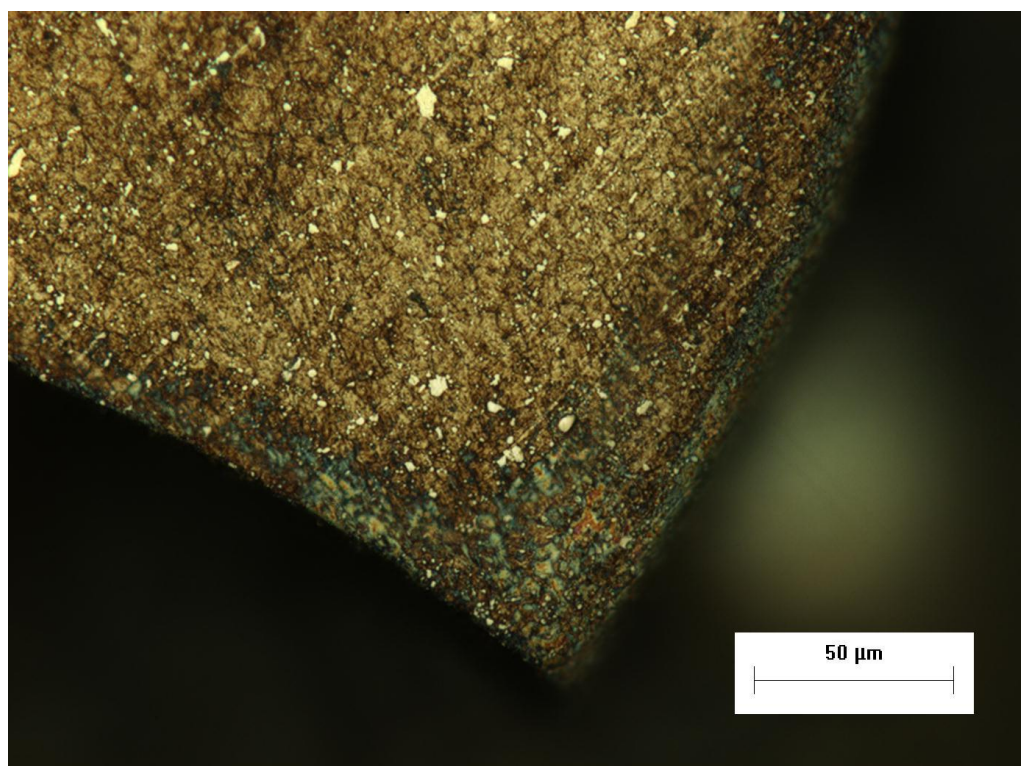
**Figura 22 – Grupo 3 ampliação 200x**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 23 – Grupo 3 ampliação 500x**  
Fonte: Autoria própria.

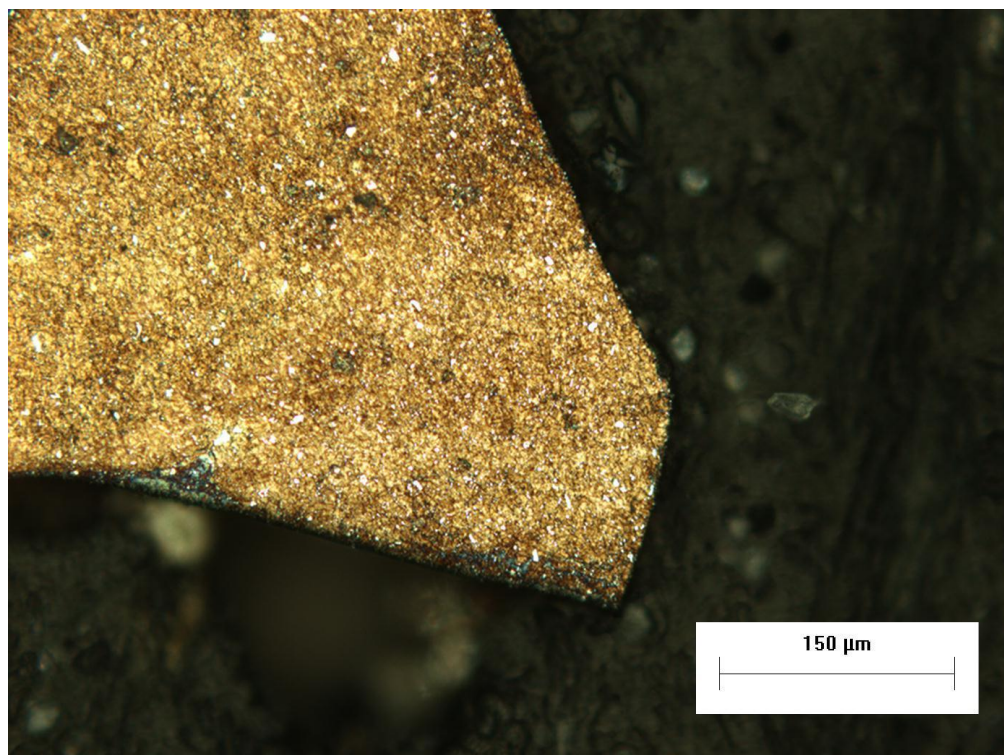


**Figura 24 – Grupo 4 ampliação 200x**  
Fonte: Autoria própria.

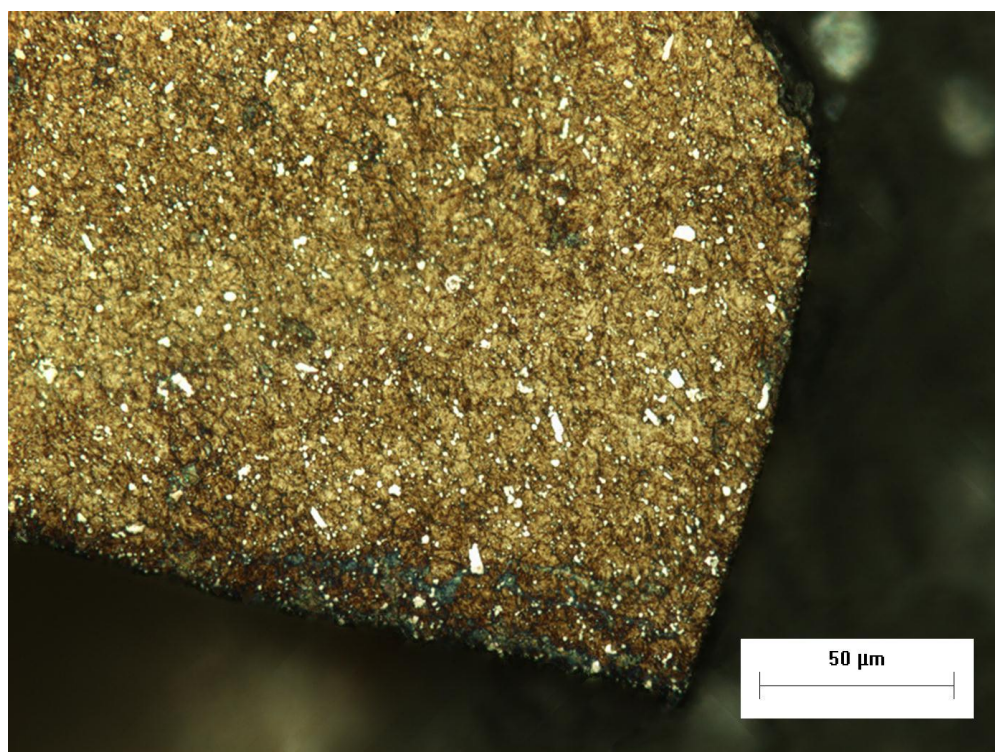


**Figura 25 – Grupo 4 ampliação 500x**  
Fonte: Autoria própria.





**Figura 26 – Grupo 5 ampliação 200x**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 27 – Grupo 5 ampliação 500x**  
Fonte: Autoria própria.

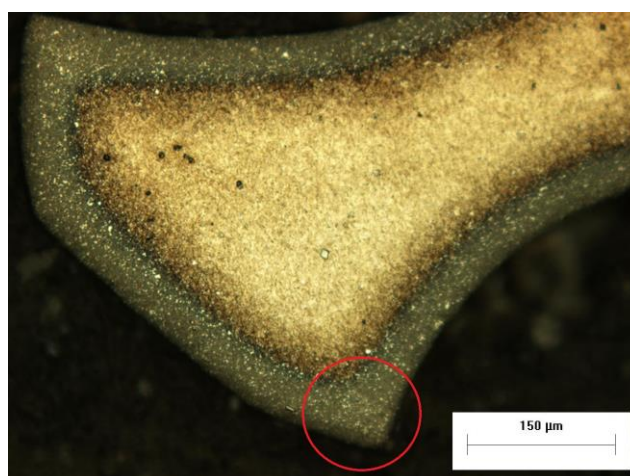
Pode-se perceber, visualmente, que há um decréscimo da espessura da camada nas amostras dos grupos 1 ao 4. Para essas ferramentas houve a variação do parâmetro tempo, no processo de nitretação, mantendo-se constantes os demais parâmetros. Resultando em um crescimento da espessura de camada proporcional ao tempo do tratamento. A amostra do grupo 1 (Figura 18) teve a maior espessura de camada. Na tabela 10 estão descritas as espessuras de camadas em cada respectivo tratamento segundo a norma ASTM 8304.

**Tabela 10 – Espessuras de camadas nitretadas das amostras**

Espessura de Camada		
Grupo	Valor	Unidade
1	58	$\mu\text{m}$
2	29	$\mu\text{m}$
3	19,5	$\mu\text{m}$
4	11	$\mu\text{m}$
5	8,5	$\mu\text{m}$

**Fonte: Autoria própria.**

No perfil da broca pode-se visualizar um aumento da espessura de camada de nitretos na região do flanco de corte. Esta região apresentou uma maior espessura da camada de difusão, comparada a outras localidades, como mostra a figura 28. Tal fenômeno se deve ao efeito de borda, como descrito anteriormente.



**Figura 28 – Efeito de borda**

**Fonte: Autoria própria.**

A quebra das brocas dos grupos 1 ao 3 pode ser explicada pela espessura de camada nitretada. Como observado, as amostras apresentaram uma elevada espessura de camada nas regiões do flanco, sendo que tal região exerce a principal atuação no momento de retirada do material no processo de usinagem. Grandes camadas de nitretos podem fragilizar a região no momento da furação.

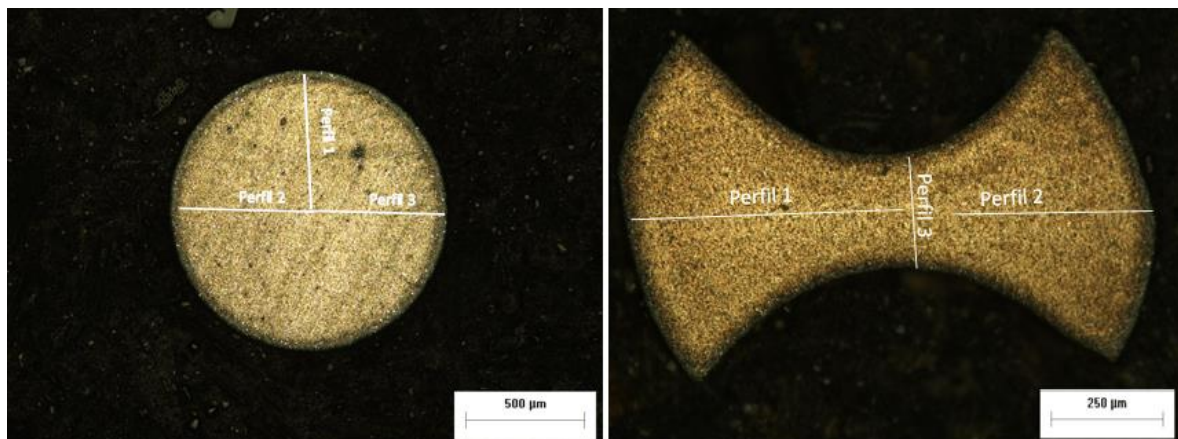
Esta característica pode ser negativa para o processo, pois a possível quebra por fragilidade da região torna a ferramenta “cega”, ou seja, no instante inicial o flanco quebra, a ferramenta continua penetrando no material sem que haja a retirada do cavaco, o que ocorre até o instante da quebra da broca.

Nos grupos 4 e 5 houve uma menor formação de camada nitretada na região do flanco, essa espessura reduzida de camada pode ser o motivo do aumento da vida útil da ferramenta.

#### 4.4 Microdureza

Inicialmente, para o estado de fornecimento, foram efetuadas 3 medições na superfície, obtendo-se como média o resultado de 985 HV.

Nos demais grupos de amostras foram realizadas medições conforme o perfil I e perfil II e perfil III (Figura 29). Variações na dureza devido a diferenças na geometria da peça tornaram indispensáveis essas medições.

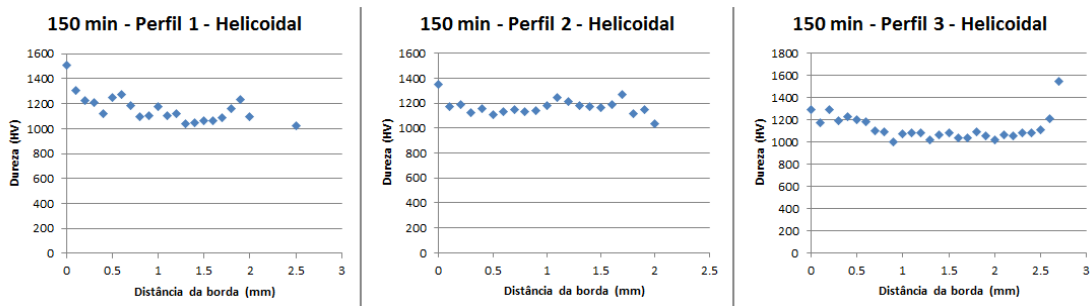


**Figura 29 – Perfis para medição de dureza**

**Fonte: Autoria própria**

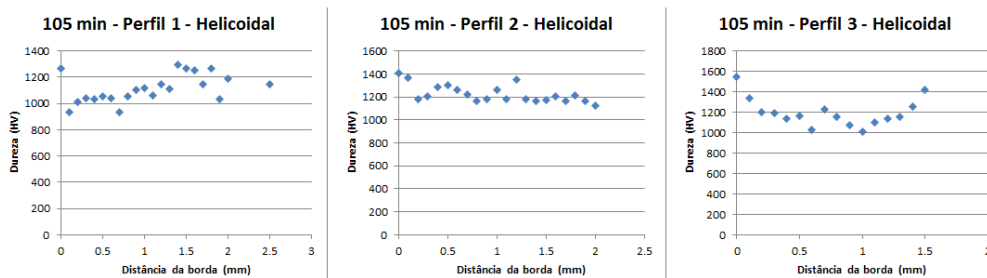
Para o grupo 1, tem-se os resultados mostrados na figura 30. Conforme PREIZNER (2012), o resultado esperado é um decréscimo no sentido da borda para o interior da broca. A dureza máxima encontrada foi de 1508 HV, comprovando o aumento substancial de dureza provocado pelo tratamento de nitretação.



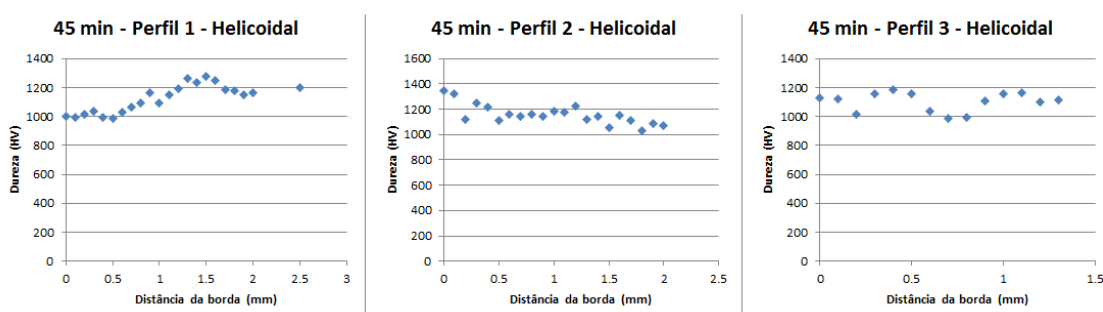


**Figura 30 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 1.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Seguindo a mesma linha, foram obtidos resultados similares para os grupos 2 e 3, evidenciados nas figuras 31 e 32. Para o grupo 2, a dureza máxima foi de 1417 HV e para o grupo 3, 1344 HV.



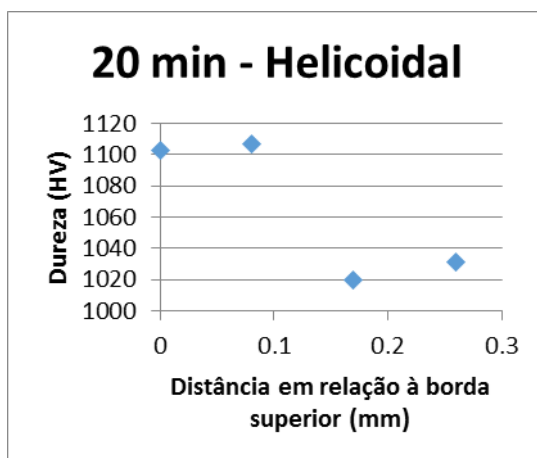
**Figura 31 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 2.**  
**Fonte: Autoria própria.**



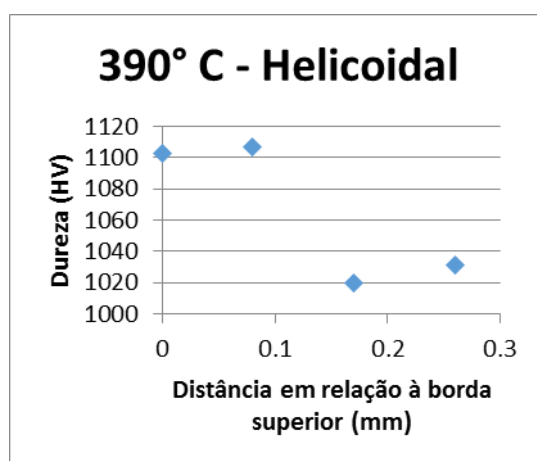
**Figura 32 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 3.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os grupos 4 e 5 obtiveram os menores valores de dureza, quando comparados aos demais tratamentos, resultando em uma dureza máxima de 1100 HV. Como para estes grupos não foram adicionados os pares de corpo de provas para medição

do perfil de dureza, foram realizadas as durezas nas próprias brocas de diâmetro 1,0mm.



**Figura 33 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 4.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 34 – Relação entre Dureza e Distância da camada do grupo 5.**  
Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, pôde-se concluir que o tratamento de nitretação a plasma pode ser um atrativo para um ganho em relação à vida útil, em número de furações em ferramentas de corte em aço rápido M2.

Parâmetros de nitretação com baixas concentrações de nitrogênio (6%), temperatura de 390°C e tempo de tratamento de 30 minutos apresentaram resultados que proporcionaram um aumento no número de furações em até 63%, se comparados às ferramentas que não foram submetidas a nenhum tratamento de superfície.

Tratamentos de nitretação com as mesmas atmosferas, porém com temperatura de 450° C e maiores tempos, apresentaram um desempenho inferior, sofrendo quebras nos instantes iniciais do processo de usinagem.

Em geral, as brocas nitretadas apresentaram aumentos consideráveis na dureza superficial. Tal característica favoreceu o aumento da vida útil (grupo 4 e 5), ao passo que, nos demais grupos, o aumento da dureza e espessura de camada tornaram a ferramenta frágil, em contato com o material de usinagem.

Comparando as características na usinagem em ambos os grupos, brocas nitretadas proporcionaram uma formação contínua de cavaco, o que não ocorreu com as ferramentas em estado de fornecimento. Esta característica comprova o favorecimento do tratamento para retirada do cavaco do material, gerando menor temperatura de trabalho e obtendo um ganho no número de furações.

Desta forma, é possível afirmar que para uma aplicação específica de usinagem, furação em material base ABNT 1045, o processo de tratamento de superfície com a utilização de parâmetros específicos, acarreta em resultados que favorecem o ganho de vida útil em número de furações.

Para trabalhos futuros são sugeridos os seguintes temas: (i) análise do aumento de vida útil em brocas de aço nitretadas x espessuras de camadas; (ii) análise do atrito de brocas de aço rápido nitretadas em materiais de usinagem.



## REFERÊNCIAS

ABNT 6189: Aço – Ferramenta.

ASTM 8304: Medição de espessura de camada.

ALVES JR., Clodomiro. Nitretação a plasma: Fundamentos e Aplicações, Natal/RN: Brasil, 2001

CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica. 2.ed. São Paulo: Editora McGrawHill LTDA, 1986.

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/>> Acesso em 12 jul. 2015.

COPINI, Nivaldo Lemos; DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. Ed. Artliber, 2008, 6a edição.

GGD, Metais. Catálogo de Aços para Construção Mecânica. São Paulo, 2014. Disponível em: <[www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-1045/](http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-1045/)> Acesso em 24 jan. 2015.

IRWIN, Ferramentas. Brocas para Metal. Disponível em: <<http://www.irwin.com.br>>. Acesso em 15 dez. 2014.

ISO 3685. Tool life testing with single-point turning tools.

KWIETNIEWSKI, C.; FONTANA, W.; MORAES, C.; ROCHA, A. da S.; HIRSCH, T.; REGULY, A. Nitrided layer embrittlement due to edge effect on duplex treated AISI M2 high-speed steel. Elsevier: Surface and Coatings Technology, Edition 179, 27–32, 2004.

MIGUEL, Wesley Antonio. Tratamentos Termoquímicos: Nitretação. Faculdade de Tecnologia. Mauá, 2010.

MOHAMMADZADEH, R; AKBARI, A; DROUET, M, Microstructure and wear Properties of AISI M2 tool steel on RF plasma nitriding at different N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> gas compositions. Surface and Coatings Technology, Edition 258, 566-573, 2014.

NOVA CHAMA, Tratamento Térmico. Equipamentos para Tratamento Térmico.

PREIZNER, Isaac Matos. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO PRÉVIO DE NITRETAÇÃO SOB PLASMA DE SUPERFÍCIES DÚPLEX REVESTIDAS COM TiN EM SUBSTRATO DE AÇO RÁPIDO AISI M2. Curitiba: Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

PYE, David. Practical nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. ASM International Materials Park, Ohio, 2003.

ROCHA, A. da S.; STROHAECKER, T.; TOMALA, V.; HIRSCH, T., Microstructure and residual stresses of a plasma-nitrided M2 tool steel. Surface and Coatings Technology, Edition 115, 24–31, 1999.

ROCHA, A. da S.; STROHAECKER, T.; TOMALA, V.; HIRSCH, T., Effect of different surface states before plasma nitriding on properties and machining behavior of M2 high-speed steel. Surface and Coatings Technology, Edition 165, 176–185, 2003.

STEMMER, Caspar Eurich Ferramentas de Corte II. Florianópolis: Editora UFSC, 1992.

STOETERAU, Rodrigo Lima. Aula 09 – Processos de Furação. Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2011.

VILLANOVA, Rodrigo Lupinacci. Notas de aula de tratamentos de superfície. Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

VILLARES METALS - Catálogo de aços Villares Metals – 2003, 2p.

TOOLS, Eternal. Carbide Micro Drill Bits. Disponível em: <<http://www.eternaltools.com/carbide-micro-drills/>>. Acesso em 26 jan. 2015.