

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ – UFPI
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO – PRPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS

APLICAÇÃO DE NITRETAÇÃO E TRATAMENTO DUPLEX EM BROCAS DE
AÇO RÁPIDO - HSS

Mestrando: Petteson Linniker Carvalho Serra
Orientador: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa

Teresina – Piauí
2018

PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA

**APLICAÇÃO DE NITRETAÇÃO E TRATAMENTO DUPLEX EM BROCAS DE
AÇO RÁPIDO - HSS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, como requisito complementar à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa

Teresina – Piauí

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco

- S487a Serra, Petteson Linniker Carvalho.
Aplicação de nitretação e tratamento duplex em brocas de
aço rápido - HSS / Petteson Linniker Carvalho Serra. – 2018.
65 f.
- Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos
Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.
“Orientador: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de
Sousa”.
1. Ciência dos Materiais. 2. Nitretação a plasma.
3. Tratamento Duplex. 4. Brocas de Aço Rápido HSS.
5. Furação. I. Título.

CDD 620.112

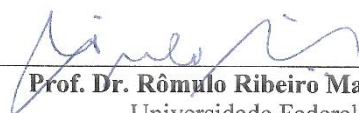
PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA

**APLICAÇÃO DE NITRETAÇÃO E TRATAMENTO DUPLEX EM BROCAS DE
AÇO RÁPIDO - HSS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Piauí–UFPI, como requisito complementar à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 19/02/2018

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa
Universidade Federal do Piauí
Orientador



Prof. Dr. Heurison de Sousa e Silva
Universidade Federal do Piauí
Examinador Interno



Prof. Dr. Thércio Henrique de Carvalho Costa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus pelo dom da vida e pela capacidade, e aos meus pais, a quem devo cada passo dado e cada conquista alcançada, pois sempre foram a maior fonte de inspiração e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela infinidade de bênçãos, pela capacidade, pela saúde e pelo amor mais puro, sem Ele nada seria possível.

À minha família, pelo apoio incondicional. Especialmente meus pais, que além do conforto e todas as condições que precisei para chegar até aqui, nos passaram os valores mais importantes de educação e humildade, e minhas irmãs pelo o amor, carinho e por serem minhas melhores amigas.

À minha namorada, pelo amor, compreensão, carinho e apoio, que fazem eu me sentir bem mais forte do que sou e me impulsionam na direção dos meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa, pela disponibilidade, confiança, amizade, difusão de conhecimento, que foram fundamentais durante todas as etapas deste trabalho.

Ao meu professor e amigo João Rodrigues de Barros Neto, pelo despertar do interesse pela ciência e pela grande ajuda na realização desse trabalho. Poucos têm a sorte de ter dois orientadores

Aos colegas do LabPlasma (UFPI) pela colaboração nas etapas do trabalho. Especialmente aos meus amigos, Marcos Guilherme, Franklyn, Wesley e André, pela grande ajuda em etapas fundamentais desse trabalho.

Aos colegas da Pós-graduação, pelo companheirismo e experiências compartilhadas.

Aos colaboradores dos Laboratórios de Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Ceará – UFC e do Instituto Federal do Piauí – IFPI, principalmente o professor Sérgio, pela paciência na realização do ensaio de desempenho.

Aos servidores lotados do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí, principalmente os técnicos Miquéias e Patrick, pela ajuda na parte prática. À Nilvânia e ao Seu Lucrécio pela convivência durante a redação do presente trabalho.

Aos meus amigos, que para a minha sorte são enumeráveis em um parágrafo de agradecimentos, principalmente as famílias Laranja Mecânica e Tesouras, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Ao secretário e parceiro Kelson, por sempre se mostrar solícito em ajudar e por descomplicar as nossas tarefas durante essa etapa importante da nossa formação.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a elaboração deste trabalho.

“Se não está onde queria estar ou se não realizou tudo que esperava atingir, o mais provável é que a razão resida não à sua volta, mas dentro de você. Assuma a responsabilidade e, depois, aja. Primeiro deve acreditar em si mesmo e no seu valor. Não pode esperar que os outros descubram seu esconderijo. Não pode ficar parado esperando que aconteça um milagre ou que apareça a oportunidade certa. Você deve pensar em si mesmo como uma colher de pau, e o mundo o seu caldeirão. Mexa a colher. Coragem!”.

(Nick Vujicic)

RESUMO

A vida útil das ferramentas está diretamente ligada à produtividade e à competitividade das indústrias manufatureiras. Nesse contexto, a aplicação de revestimentos superficiais é a melhor alternativa para otimização de brocas helicoidais, especialmente as de pequeno diâmetro. O objetivo do presente trabalho é avaliar a aplicação de nitretação a plasma (nas temperaturas de 450 °C e 500 °C) e de tratamento duplex em brocas de aço rápido - HSS. A nitretação a plasma produz uma camada superficial com elevada dureza e resistência ao desgaste, com a vantagem de manter a tenacidade do núcleo. O tratamento duplex consiste na deposição de um filme fino (o filme de nitreto de titânio - TiN apresenta elevada dureza, resistência ao desgaste e estabilidade térmica) associados a um tratamento preliminar de nitretação (importante para melhorar a adesão do filme). As brocas foram caracterizadas por Ensaio de Microdureza Vickers, Microscopia Eletrônica de varredura – MEV, Espectroscopia por Dispersão de Energia – EDS e ensaio de desempenho, onde foram medidos o desgaste de flanco na aresta de corte e os diâmetros dos furos usinados em corpos de prova de aço SAE1045. Todos os tratamentos resultaram em uma dureza superficial maior do que a do material de partida. As ferramentas submetidas à nitretação a 500 °C e ao tratamento duplex, apresentaram desempenho abaixo do esperado, não apresentando viabilidade para aplicação nessas condições. A broca nitretada a 450 °C apresentou maior vida útil do que a broca sem tratamento, e produziu todos os furos respeitando os limites definidos pela tolerância 9H12. O trabalho mostrou que a aplicação de nitretação a plasma (temperatura de 450°C) contribui para o aumento da vida útil de brocas de aço rápido HSS e para melhoria da qualidade dimensional dos furos.

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

ABSTRACT

The useful life of the tools is directly linked to the productivity and competitiveness of the manufacturing industries. In this context, the application of surface coatings is the best alternative for optimization of helical drills, especially those of small diameter. The objective of the present work is to evaluate the application of plasma nitriding (at temperatures of 450 ° C and 500 ° C) and duplex treatment in drills of high speed steel HSS. Plasma nitriding produces a surface layer with high hardness and wear resistance, with the advantage of maintaining nucleus tenacity. The duplex treatment consists of the deposition of a thin film (TiN titanium nitride film exhibits high hardness, wear resistance and thermal stability) associated with a preliminary nitriding treatment (important for improving film adhesion). The drills were characterized by Vickers Microhardness Test, Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) and performance test, where the flank wear was measured at the cutting edge and the diameters of the holes machined in steel SAE1045. All treatments resulted in a higher surface hardness than that of the starting material. The tools submitted to nitriding at 500 ° C and to the duplex treatment presented below-expected performance, not presenting viability for application under these conditions. The nitrided drill at 450 ° C had a longer life than the untreated drill and produced all holes within the limits defined by the tolerance 9H12. The work showed that the application of plasma nitriding (temperature of 450 ° C) contributes to increase the useful life of high speed steel drills - HSS and to improve the dimensional quality of the holes.

Keywords: Plasma Nitriding, Duplex Treatment, High Speed Steel Drills - HSS, Drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento dos aços rápidos no revenimento (curva 1-efeito da decomposição da martensita, curva 2 - efeito da precipitação dos carbonetos de liga e curva 3 – curva característica do revenimento).....	7
Figura 2 – Tipos de descarga elétrica.	9
Figura 3 – Aspecto visual do plasma na descarga luminescente anômala	10
Figura 4 – Representação esquemática de um equipamento básico para nitretação a plasma	12
Figura 5 – Mecanismo de eliminação do arco catódico com utilização de fonte pulsada.....	14
Figura 6 – Mecanismo de formação da camada nitretada segundo Kölbell.....	15
Figura 7 – Morfologia da camada nitretada	16
Figura 8 – Esquema representativo da deposição por pulverização catódica	18
Figura 9 – Esquema representativo do equipamento de deposição a plasma com gaiola catódica.	20
Figura 10 – Terminologia de uma broca helicoidal	22
Figura 11 – Ângulos de uma broca helicoidal: (a) ângulo de hélice – γ ; (b) ângulo de incidência ou folga - α ; (c) ângulo de ponta – σ	22
Figura 12 – Tipos de desgaste por abrasão.....	24
Figura 13 – Tipos de desgaste mais comuns em ferramentas.	25
Figura 14 – Brocas de aço rápido: (a) sem revestimento; (b) com revestimento	27
Figura 15 – Imagem do reator de nitretação a plasma do LabPlasma – UFPI.	28
Figura 16 – (a) Base de aço-carbono utilizada para dar suporte às brocas no reator; (b) Posicionamento das brocas para nitretação no reator.	29
Figura 17 – Montagem do arranjo para deposição com gaiola catódica.	31
Figura 18 – Regiões estudadas (Cortes A, B, C e superfície de folga).	32
Figura 19 – (a) Corpo de prova modelado no SolidWorks; (b) Corpos de prova antes e após furação.	34
Figura 20 – Equipamento utilizado para aquisição de imagens das arestas de corte das brocas.	35
Figura 21 – Gráfico de média e desvio-padrão da microdureza da superfície de folga das brocas CSR, CCR, N450, N500 e Duplex.	38
Figura 22 – Gráfico de dureza do núcleo ao longo do corpo das brocas CSR, N450 e N500.	40

Figura 23 – Micrografias obtidas por microscopia óptica das amostras transversais das brocas comerciais (aumento de 500 vezes), ataque com nital a 4%. (a) Comercial sem revestimento; (b) Comercial com Revestimento.	42
Figura 24 – Pontos para análise por EDS da broca comercial com revestimento – CCR: (a) Ponto A (precipitado); (b) Ponto B (matriz).....	43
Figura 25 – Microscopia eletrônica de varredura das seções transversais das brocas submetidas à nitretação convencional com aumento de 5000 vezes. (a) N450 Corte C; (b) N500 Corte C; (c) N450 Corte B; (d) N500 Corte B; (e) N450 Corte A; (f) N500 Corte A. ..	45
Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal (corte A) da broca CCR.	46
Figura 27 – Broca nitretada à 500°C após ensaio de desempenho.....	48
Figura 28 – Desgaste de flanco das brocas CSR, CCR, N450 e Duplex.....	49
Figura 29 – Fenômeno de desgaste por adesão na broca comercial sem revestimento – CSR após usinar 12 furos.....	51
Figura 30 – Diâmetros dos furos das brocas CSR, CCR, N450 e Duplex.	52
Figura 31 – Desgaste de flanco nas arestas de corte da broca duplex após usinagem do 4º furo.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise quantitativa por EDS da broca CSR	42
Tabela 2 – Análise quantitativa por EDS da broca comercial com revestimento – CCR (composição nos pontos A e B representados na Figura 24.	43
Tabela 3 – Medidas de espessura da camada de compostos nas brocas nitretadas a 450°C e 500°C e do filme na broca submetida ao tratamento duplex a 500°C.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/V	Razão área sobre volume
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta postiça de corte
Ar	Argônio
BTA	<i>Broaching Trepaning Association</i> (
CCR	Broca comercial com revestimento
CNC	<i>Computer Numerica Control</i> (Comando Numérico Computadorizado)
Cr	Cromo
CSR	Broca comercial sem revestimento
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> (Deposição Química de Vapor)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normiing</i> (Instituto Alemão de Normatização)
Duplex	Broca submetida ao tratamento duplex
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
Fe	Ferro
Fe ₂₋₃ N	Nitreto de ferro
Fe4N	Nitreto de ferro
FeN	Nitreto de ferro
H12	Tolerância geométrica (campo de tolerância H e qualidade 12)
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
HRC	Dureza Rockel C - Unidade de medida de dureza
HSS	<i>High Speed Steel</i> (aço rápido)
HV	Dureza Vickers - Unidade de medida de dureza
kgf	Quilograma-força - Unidade de medida de força
Mesh	Unidade de referência de granulometria
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	milímetro - Unidade de medida de comprimento
Mo	Molibdênio
N450	Broca nitretada a 450 °C

N500	Broca nitretada a 500 °C
OSFL	<i>One Step Feed Length</i> (Avanço de cada etapa)
Pa	Pascal - Unidade de medida de pressão
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> (Deposição Física de Vapor)
RPM	Rotações por minuto - unidade de medida de rotação
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros da Mobilidade)
Si	Silício
TiN	Nitreto de titânio
torr	Unidade de medida de pressão
V	Vanádio
V	Volts
$V_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
W	Tungstênio
α	Ângulo de incidência ou folga (broca helicoidal)
γ	Ângulo de hélice (broca helicoidal)
γ'	Nitreto de Ferro FeN
ϵ	Nitreto de Ferro Fe ₂₋₃ N
σ	Ângulo de ponta (broca helicoidal)
°	Graus - Unidade de medida de ângulo
°C	Graus Celsius - Unidade de medida de temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	AÇO RÁPIDO	6
2.1.1	Comportamento dos Aços-Rápidos no Revenimento	7
2.2	NITRETAÇÃO	8
2.2.1	Nitretação a Plasma	8
2.2.1.1	O Plasma	9
2.2.1.2	O Processo	11
2.2.1.3	Formação e Morfologia da Camada Nitretada.....	14
2.3	DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS	17
2.3.1	Deposição por Pulverização Catódica (<i>Sputtering</i>)	18
2.3.1.1	Deposição a plasma com gaiola catódica.....	19
2.4	FURAÇÃO	20
2.4.1	Geometria da Broca	21
2.5	DESGASTE	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAL.....	27
3.2	TRATAMENTO	28
3.2.1	Limpeza das brocas, da base e das gaiolas catódicas	29
3.2.2	Nitretação convencional	29
3.2.3	Tratamento duplex	30
3.3	NOMENCLATURA	31
3.4	CARACTERIZAÇÃO	31
3.4.1	Corte.....	31
3.4.2	Ensaio de Microdureza.....	32

3.4.3	Preparação Metalográfica	32
3.4.4	Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	33
3.4.5	Análise de Desempenho.....	33
3.4.5.1	Corpo de Prova	33
3.4.5.2	Critérios de Parada.....	34
3.4.5.3	Programa CNC e Parâmetros de Usinagem	35
3.4.5.4	Medição dos Furos.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	ENSAIOS DE MICRODUREZA	38
4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA, MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)	41
4.2.1	Brocas Comerciais	41
4.2.2	Brocas Tratadas.....	44
4.3	ENSAIO DE DESEMPENHO.....	48
5	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A globalização impulsiona as empresas a direcionar seus esforços para a redução de custos e o aumento da competitividade. Os dados de crescimento pós crise econômica (entre 2010 e 2017) mostram que os países que apresentaram maior crescimento econômico foram aqueles que focaram suas estratégias na oferta (otimização dos setores de produção), enquanto aqueles que concentraram demasiadamente seus esforços na demanda entraram em recessão. (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA-CNI, 2017).

Nas indústrias manufatureiras o aumento da competitividade passa pela otimização dos processos de usinagem, que pode ser alcançada através de duas estratégias: redução dos tempos não-produtivos (associado a tempos passivos que envolvem atividade humana) e redução dos tempos produtivos (BAPTISTA; COPPINI, 2001). O desenvolvimento de tecnologias de melhoria das ferramentas de corte, pode contribuir na redução dos tempos não produtivos (através da disponibilidade de ferramentas mais resistentes, que aumentam os intervalos entre trocas de ferramentas, em consequência do aumento da vida útil) e na redução dos tempos produtivos (desenvolvendo ferramentas capazes de trabalhar com maiores velocidades de corte ou realizar um menor número de passes para a mesma operação de usinagem). (BAPTISTA, 2002; BAPTISTA; COPPINI, 2001)

A utilização do metal duro representou um grande 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 – HSS (SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013).

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 (KISHUROV et al., 2012). Dentre os tratamentos superficiais pode-se destacar a nitretação a plasma, neste tratamento as propriedades da superfície são modificadas através da interação entre o plasma e a superfície metálica exposta. É caracterizado como um processo controlável e de elevada reprodutibilidade, além de se tratar de um processo não poluente, característica essencial diante da necessidade de aumentar a responsabilidade ambiental no setor industrial (CHEN; STOCK; MAYR, 1994; DE ARAÚJO et al., 2007)

Outra alternativa para melhorar as propriedades superficiais das ferramentas é a aplicação de revestimentos de elevada dureza por deposição física de vapor - PVD. O processo de deposição quando associado a um tratamento preliminar de nitretação, é chamado de tratamento duplex e é mais eficiente para aplicação em ferramentas (ROUSSEAU et al., 2015). A nitretação produz uma transição mais suave entre a dureza da superfície e a do substrato, contribuindo para uma melhor adesão do filme depositado, diminuindo assim a probabilidade de delaminação. (NAEEM et al., 2017; ROUSSEAU et al., 2015). Um dos revestimentos mais utilizados é o nitreto de titânio TiN, que tem como características, elevada dureza, estabilidade térmica e resistência à abrasão. (BASHIR et al., 2017)

Neste trabalho foram aplicados os tratamentos de nitretação a plasma com temperaturas de 450 °C e 500 °C e um tratamento duplex (Nitretação convencional seguida de deposição de nitreto de titânio – TiN), em brocas comerciais de aço rápido com o objetivo de avaliar a viabilidade da aplicação desses tratamentos nas ferramentas. Além da broca de aço rápido sem tratamento, foi utilizada uma broca comercial revestida como parâmetro de comparação.

Após a introdução, o segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica com os conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho, apresentando o material de partida para o tratamento, o aço rápido. A revisão segue com a apresentação do tratamento de nitretação a plasma, discutindo aspectos gerais (como as características do plasma, os detalhes do processo, além dos mecanismos de formação da camada nitretada e a sua morfologia). É abordada também a deposição de filmes finos, com ênfase para a deposição por *sputtering* reativo em gaiola catódica. Logo em seguida, são apresentadas as características da furação e a principal ferramenta utilizada no processo, a broca helicoidal. O capítulo de revisão é concluído com a discussão dos principais mecanismos de desgaste.

O capítulo três, por sua vez, apresenta os materiais e métodos utilizados no trabalho, abordando as etapas que vão desde a limpeza do material de partida (brocas), passando pela aplicação dos tratamentos (com exposição dos parâmetros utilizados), até a caracterização. Na caracterização foram realizados ensaios de microdureza Vickers na superfície de folga e no núcleo de amostras transversais retiradas na ponta, no meio e na base do corpo das brocas. A espessura e a uniformidade da camada nitretada foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura – MEV. O desempenho das brocas foi avaliado após usinagem de corpos de prova de aço SAE1045 em um centro de usinagem por comando numérico - CNC, onde foram comparados o desgaste máximo de flanco nas brocas e a qualidade dimensional dos furos usinados. Foram aplicadas ainda as técnicas de microscopia ótica e espectroscopia por dispersão

de energia (EDS), com a finalidade de verificar a microestrutura e a composição das brocas comerciais.

No capítulo quatro são apresentados os resultados e respectivas discussões, comparando as propriedades conferidas às brocas com a aplicação dos tratamentos superficiais, além da análise do desempenho real das ferramentas.

O capítulo cinco traz as conclusões. O trabalho é finalizado com a apresentação das referências utilizadas e das sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO RÁPIDO

Os aços-rápidos são ligas metálicas aplicadas principalmente em ferramentas de torneamento, aplainamento e furação, que requerem elevada dureza e resistência ao desgaste. O nome aço rápido deve-se às elevadas velocidades de corte permitidas com o seu advento. (WISELL, 1981)

Os aços rápidos são ligas quaternárias Ferro-Tungstênio (ou Molibdênio) -Cromo-Carbono que podem apresentar também os elementos de liga vanádio, cobalto e nióbio. São divididos em dois grupos: aços ao tungstênio (W) que são indicados pela letra “T” e os aços ao molibdênio (Mo) indicados pela letra “M”. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; XAVIER, 2011)

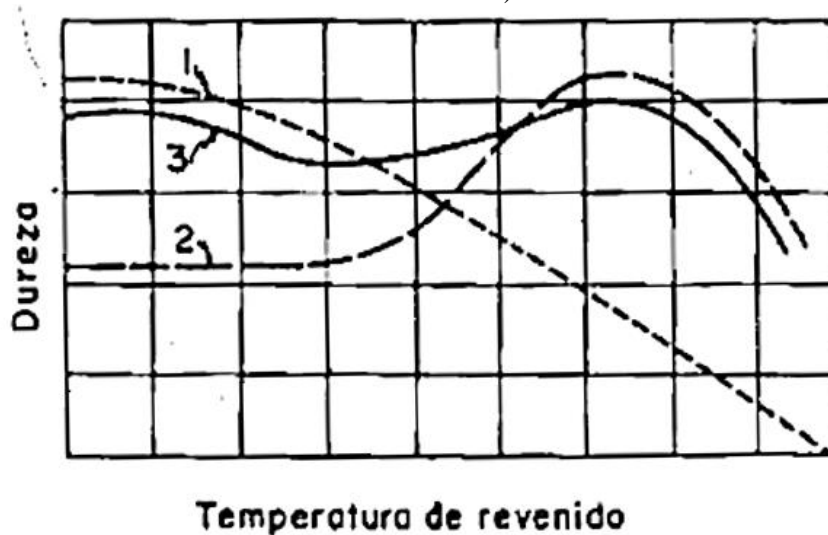
O seu processamento geralmente inclui um tratamento de austenitização à elevadas temperaturas que origina uma microestrutura constituída de austenita e carbonetos. Após tratamento térmico de têmpera, a estrutura é resultante é a martensita com presença de carbonetos não dissolvidos e austenita retida. Essa estrutura é caracterizada por um estado de elevadas tensões internas, dureza e fragilidade. A liga é então revenida para alívio das tensões internas, fragilidade e instabilidade. A microestrutura resultante é constituída por martensita revenida e carbonetos. (XAVIER, 2011)

Para aplicação em ferramentas como brocas, brochas, alargadores e alguns tipos de fresas, a aplicação de materiais como o metal duro é inviável, devido à geometria ou às condições de usinagem exigidas. Nesse contexto, o melhoramento das ferramentas é possibilitado pela aplicação de tratamentos superficiais em ferramentas de aço rápido, entre essas alternativas destaca-se a nitretação a plasma e a deposição de revestimentos por Deposição Física a Vapor - PVD. Esses revestimentos contribuem para a diminuição dos esforços de corte, do atrito e do desgaste, resultando em maiores vidas úteis para as mesmas condições de usinagem. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; PINEDO, 2004; ROUSSEAU et al., 2015)

2.1.1 Comportamento dos Aços-Rápidos no Revenimento

A Figura 1 mostra a curva típica do comportamento dos aços rápidos no revenimento.

Figura 1 - Comportamento dos aços rápidos no revenimento (curva 1-efeito da decomposição da martensita, curva 2 - efeito da precipitação dos carbonetos de liga e curva 3 – curva característica do revenimento).



Fonte: FERRARESI (1970).

O comportamento do aço rápido no revenimento pode ser dividido em duas fases. A primeira fase consiste na decomposição da martensita, “curva 1” na Figura 1, que provoca a redução contínua da dureza e é comum em todos os aços. A segunda fase corresponde à precipitação dos carbonetos de liga da martensita revenida, “curva 2”, que é responsável pelo endurecimento adicional por precipitação. Essa segunda fase diferencia o comportamento dos aços liga com relação ao dos aços convencionais durante o revenimento. A soma aritmética das duas curvas resulta na curva característica de revenimento do aço rápido, “curva 3”, que apresenta o fenômeno conhecido como endurecimento secundário (ocorre geralmente entre 480 °C e 565 °C), representado pelo pico na “curva 3”. Outra característica importante é a faixa de redução excessiva de dureza antes do endurecimento secundário. (FERRARESI, 1970; MARCOMINI; GOLDENSTEIN, 2012)

2.2 NITRETAÇÃO

A nitretação é um tratamento superficial em que se adiciona nitrogênio na superfície de um aço a partir de uma atmosfera de gás, um plasma ou um banho de sal. De acordo com o meio nitretante, a nitretação pode ser classificada como: nitretação a gás, nitretação líquida ou nitretação a plasma. (BHASKAR; KUDAL, 2017; PINEDO, 2004a; STEINER; MITTEMEIJER, 2016).

Os principais objetivos da nitretação são o aumento da dureza superficial e das resistências ao desgaste, à fadiga e à corrosão de materiais ferrosos e não ferrosos, com a vantagem de manter a tenacidade do substrato devido às baixas temperaturas de tratamento. (DE ARAÚJO et al., 2007; FESAHAAT; SOLTANIEH; EIVANI, 2016; SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013)

O processo de nitretação, de maneira geral, envolve três etapas: a formação de nitretos a partir de reações químicas, a adsorção superficial nas peças e a difusão dos átomos no interior das peças. (ALVES JR, 2001)

2.2.1 Nitretação a Plasma

No processo de nitretação a plasma, um gás é ionizado (plasma) a partir de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, geralmente a baixa pressão, para adicionar nitrogênio na superfície de um metal. (AGHAJANI; TORSHIZI; SOLTANIEH, 2017a; LIMA; ALVES JR; DOS SANTOS, 2005).

A camada nitretada é formada pela combinação de dois mecanismos: deposição de nitretos FeN da atmosfera e a difusão de nitrogênio no interior das peças. A camada nitretada divide-se em: camada de compostos ou camada branca, constituída por nitretos $Fe_{2-3}N$ e Fe_4N , e uma zona de difusão, que consiste em uma solução sólida de nitrogênio dissolvido na matriz. (AGHAJANI; TORSHIZI; SOLTANIEH, 2017a; ZAGONEL et al., 2006)

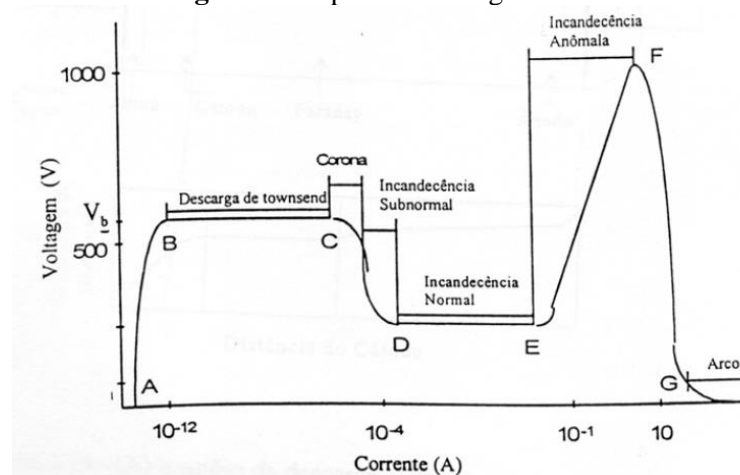
A possibilidade de controle dos parâmetros de nitretação permite a obtenção de camadas com espessuras e propriedades diferentes, essas propriedades podem ser controladas por ajustes de parâmetros de tratamento como: o fluxo e composição dos gases, a pressão e a temperatura. (LIMA; ALVES JR; DOS SANTOS, 2005; ZAGONEL et al., 2006).

2.2.1.1 O Plasma

O plasma, conhecido como o quarto estado da matéria, pode ser gerado a partir da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos em um meio à baixa pressão. O plasma é constituído de partículas neutras (átomos e moléculas) e partículas eletricamente carregadas (elétrons e íons). Macroscopicamente o plasma é eletricamente neutro, o que implica dizer que a soma da densidade de elétrons com a densidade de íons negativos deve ser igual à densidade de íons positivos. Se as cargas do plasma forem desbalanceadas, os elétrons se movem automaticamente buscando neutralizar os efeitos desse desbalanceamento. (AIT GOUGAM; TRIBECHE, 2011; BURM, 2012; CHAPMAN, 1980)

Com a aplicação de uma diferença de potencial a partir de aproximadamente 300 V entre dois eletrodos em um sistema a baixa pressão, as partículas eletricamente carregadas tendem a se mover e colidir com partículas neutras, produzindo mais elétrons e íons livres. Esses choques acabam gerando uma descarga elétrica conhecida como descarga incandescente. Os diferentes tipos de descarga em função da corrente e da tensão são representados na Figura 2. (ALVES, 2002; ALVES JR, 2001)

Figura 2 – Tipos de descarga elétrica.



Fonte: ALVES (2002).

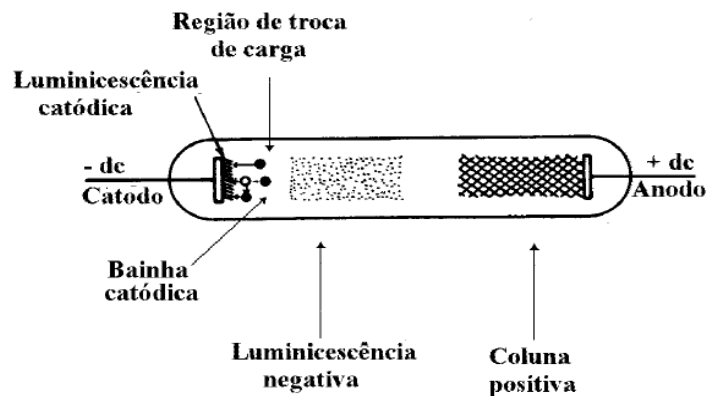
Para que a descarga no plasma seja alto-sustentada é necessário atingir uma tensão mínima. Na nitretação essa tensão varia de 500 V a 650 V, a uma pressão de 150 Pa, com uma atmosfera constituída de nitrogênio e hidrogênio. A faixa em que ocorre esse descarga alto-sustentada é chamada de descarga de *Townsend* e corresponde a região (BC) na Figura 2. Para

correntes acima de C, a descarga torna-se visível e a tensão decresce na região de Incandescência Subnormal (ALVES, 2002).

Na incandescência Normal (DE), a descarga acontece em baixa tensão e a corrente cresce com o crescimento da área de contato coberta. Por conta da baixa energia e do fato de não cobrir totalmente a superfície do cátodo, a descarga normal não é utilizada na nitretação. Quando a superfície do cátodo é totalmente coberta pela descarga incandescente, a densidade de corrente e a tensão crescem à medida que se aumenta a corrente, essa região é denominada descarga anômala e está representada na figura 2 pela trecho (EF) da curva. A descarga anômala é a utilizada na nitretação a plasma. Os elétrons emitidos no bombardeio do cátodo se movem na direção do ânodo se chocando com moléculas e produzindo íons positivos, que, por sua vez, se movem contra o cátodo e se chocam liberando novos elétrons livres. A manutenção da descarga depende da relação entre o número de elétrons emitidos pelo bombardeio no cátodo e o número de moléculas ionizadas pelos choques com esses elétrons. O aumento da corrente acima de um valor crítico F provoca a abertura do arco, que pode resultar em danos para as peças tratadas. (ALVES, 2002)

Na região de corrente anômala pode-se diferenciar algumas regiões luminosas escuras através da distribuição potencial, densidade de cargas e corrente. As regiões são mostradas na Figura 3. (ALVES JR, 2001)

Figura 3 – Aspecto visual do plasma na descarga luminescente anômala



Fonte: ALVES JR (2001).

A região luminosa localizada próxima ao cátodo é denominada luminescência catódica. Ela apresenta esse brilho por conta da excitação das partículas superficiais através do bombardeamento do cátion. A cor dessa luminosidade depende das características do plasma. A bainha catódica corresponde à região escura logo após a luminescência catódica e se

caracteriza pela baixa densidade de carga. Logo depois da bainha catódica fica a região de luminescência negativa, nessa região ocorre uma grande quantidade de choques entre as partículas, que são responsáveis pelas transferências de carga, ionizações, excitações e produção de elétrons secundários. A região de luminescência negativa e a região catódica são responsáveis por praticamente toda a queda de tensão no plasma. (ALVES, 2002; ALVES JR, 2001; BURM, 2012)

Grande parte das reações presentes no plasma acontece na região de luminescência negativa. Na ionização, a colisão de uma molécula com elétrons mais energéticos libera um cátion e dois elétrons. Quando a energia da colisão não é suficiente para retirar um elétron e ionizar uma molécula, ocorre apenas a sua excitação. Com a excitação os elétrons ocupam níveis mais energéticos, quando esse estado de maior energia é cessado, os elétrons voltam a ocupar níveis menos energéticos, resultando na emissão de fótons. A dissociação acontece quando moléculas se chocam contra os elétrons livres, originando átomos neutros, excitados ou ionizados. A recombinação ocorre quando íons chocam-se contra uma superfície, provocando a liberação de elétrons superficiais, esse elétrons se combinam com cátions, dando origem à átomos neutros.(ALVES JR, 2001)

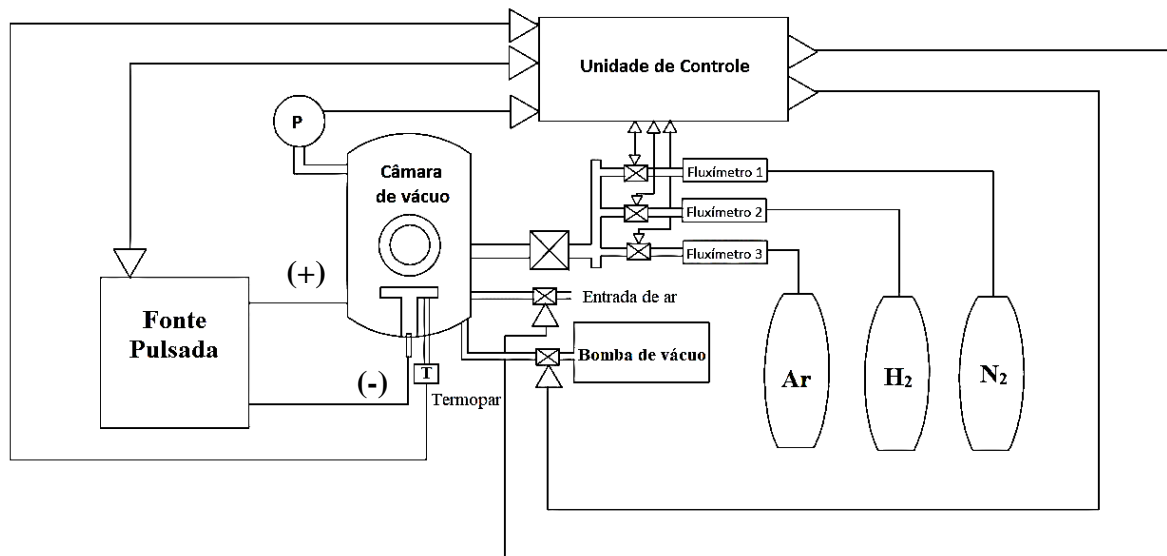
2.2.1.2 O Processo

A Figura 4 representa esquematicamente o equipamento básico utilizado na nitretação a plasma. Seus componentes principais são: uma câmara de vácuo (reator) que possui dois eletrodos, onde o cátodo é também o porta amostras; uma fonte de potência, que na Figura 4 é uma fonte pulsada mas também pode ser uma fonte de corrente contínua; um sistema de alimentação dos gases, constituído pelos cilindros de armazenamento e os fluxímetros para controle de vazão de gases, além das mangueiras e conexões; um sistema de vácuo, que possui uma bomba de vácuo responsável por manter a câmara à baixas pressões; instrumentos de medida de pressão e temperatura; e uma unidade de controle, que recebe a saída dos instrumentos de medida de pressão, temperatura e vazão e permite o ajuste dos parâmetros de tratamento (MELADO, 2011)

No tratamento é estabelecido inicialmente um vácuo de aproximadamente 10^{-2} torr, seguido da aplicação de uma diferença de potencial na faixa de 400 V a 1200 V, então é introduzido a mistura de gases até ser atingida a pressão de trabalho entre 1 e 20 torr. Com o aumento da pressão, o brilho da descarga vai aumentando, até que se atinge a pressão adequada para a nitretação, ao se atingir essa pressão a amostra já está totalmente coberta pelo plasma.

Nessas condições, os íons já estão sendo acelerados em direção ao cátodo e a peça é aquecida devido o bombardeamento iônico. A temperatura é, então, ajustada pela corrente até um valor determinado. A contagem do tempo de nitretação deve ser iniciada ao se atingir a temperatura determinada, após completado o tempo de tratamento, a fonte é desligada e a peça deve ser resfriada naturalmente no interior do reator. (ALVES JR, 2001)

Figura 4 – Representação esquemática de um equipamento básico para nitretação a plasma



Fonte: Autória própria (2018)

Uma das vantagens da nitretação a plasma é a possibilidade de tratamento em baixas temperaturas (tão baixas quanto 350 °C). Essas condições permitem a aplicação em peças que passaram por tratamento térmico anterior e em peças de aço inoxidável, onde a exposição a elevadas temperaturas favoreceria a precipitação de nitretos de cromo, e como consequência, a diminuição na resistência à corrosão (CZERWIEC; RENEVIER; MICHEL, 2000; FERREIRA; BRUNATTO; CARDOSO, 2015; LARISCH; BRUSKY; SPIES, 1999; PINEDO; MAGNABOSCO, 2015).

Com relação aos processos de nitretação líquida e gasosa, a possibilidade de controle da camada nitretada é a principal vantagem da nitretação a plasma e pode ser feita pela escolha adequada de parâmetros como a composição dos gases, tempo e temperatura de tratamento. O processo a plasma permite ainda a obtenção de camadas mais uniformes, devido à uniformidade do plasma na superfície. Outra vantagem relativa é o menor tempo de tratamento, a taxa acelerada de nitretação está relacionada à efetividade do plasma na transferência de nitrogênio

para a superfície e à presença de outras espécies ativas no plasma.(ALVES JR, 2001; KLEIN et al., 2013; PINEDO; MAGNABOSCO, 2015)

A nitretação a plasma é caracterizado como um processo com baixo impacto ambiental, pois os gases utilizados no tratamento não são tóxicos. Além disso, devido as baixas pressões em que o tratamento é realizado, a quantidade de gases desperdiçado é muito baixa. (KLEIN et al., 2013; NII; NISHIMOTO, 2012)

O tratamento de nitretação a plasma apresenta alguns problemas relacionados ao fato de que a peça de trabalho faz parte do cátodo. A intensidade com que esses problemas influenciam no tratamento está relacionada, principalmente, com à geometria da peça, detalhes como a presença de furos de pequeno diâmetro e a razão área sobre volume influenciam a uniformidade do plasma. (LI et al., 2010)

Peças complexas, que contém descontinuidades como furos profundos, especialmente os cegos, podem apresenta o efeito conhecido como “cátodo oco”. Nesse efeito, o plasma fica concentrado na região das descontinuidades, aumentando a taxa de *sputtering* e a temperatura, o que diminui a uniformidade da camada nitretada. O tamanho do furo, a pressão do gás e a densidade de corrente, são os fatores de maior influência na ocorrência do efeito de cátodo oco. (ALVES JR, 2001; GRÜN; GÜNTER, 1991; LEPICKA; GRADZKA-DAHLKE, 2016)

O confinamento do plasma na região das descontinuidades, pode gerar uma corrente localizada superior à descarga anômala, resultando na abertura de arco, com isso se estabelecerá uma queda de potencial e o potencial resultante será inferior à tensão de ruptura e a descarga deixa de ser alto-sustentada, culminando com a neutralização do plasma. Quando a fonte utilizada for de alta tensão, pode ocorrer a fusão do plasma. (ALVES JR, 2001)

Outro defeito associado à nitretação convencional é o efeito de borda, que consiste na formação de anéis de restrição na região próxima às bordas. Os anéis podem ser detectados visualmente por uma coloração não uniforme da superfície nitretada e apresentam como principal inconveniente a redução brusca de dureza entre regiões da superfície. (ALVES JR, 2001)

O efeito da razão área/volume (A/V) deve ser observado. Quanto maior for a área das peças, maior será a entrada de energia e conseqüentemente o aquecimento. Nessas situações pode ocorrer o superaquecimento de regiões com maior razão A/V. A mesma relação vale para peças diferentes que são tratadas juntas.(ALVES JR, 2001; GRÜN; GÜNTER, 1991)

Uma solução eficiente para melhorar a estabilidade e o controle da nitretação a plasma, é a utilização de uma fonte de tensão pulsada para evitar o efeito de borda e o superaquecimento localizado das peças. As propriedades da superfície podem ser controladas pela frequência do

pulso, ciclo de trabalho e tensão de saída. O comportamento das cargas ao utilizar fonte pulsada é representado na Figura 5. Durante a aplicação do pulso, o comportamento é semelhante ao apresentado com fonte de tensão D.C, havendo o confinamento de cargas na região das discontinuidades. No intervalo entre um pulso e outro (pulso desligado), as cargas são redistribuídas e o equilíbrio do plasma é reestabelecido. (ALVES JR, 2001; GRÜN; GÜNTER, 1991; LEPICKA; GRADZKA-DAHLKE, 2016)

Figura 5 – Mecanismo de eliminação do arco catódico com utilização de fonte pulsada

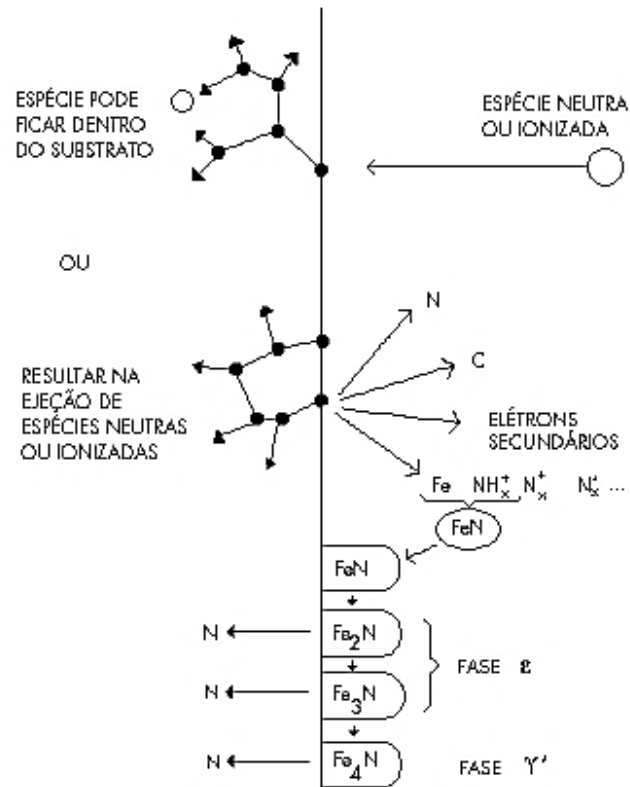


Fonte: (ALVES JR, 2001)

2.2.1.3 Formação e Morfologia da Camada Nitretada

O modelo mais aceito para descrever a formação da camada nitretada é o modelo de Kölbel, representado na Figura 6. Segundo esse modelo, a camada é formada a partir da aceleração das espécies ativas do plasma em direção à superfície das peças, ocorrendo assim, o bombardeamento iônico, que é responsável pela pulverização dos átomos da superfície (*sputtering*), esses átomos reagem com nitrogênio presente no plasma, formando nitretos instáveis da forma FeN, que posteriormente são depositados na superfície das peças. O nitreto FeN é, então, recombinado para dar origem a nitretos mais estáveis da forma Fe₂₋₃N, o nitrogênio liberado se difunde para o interior das peças (formando a camada de difusão) ou, volta para o plasma. (SAEED et al., 2013; ZHAO et al., 2006)

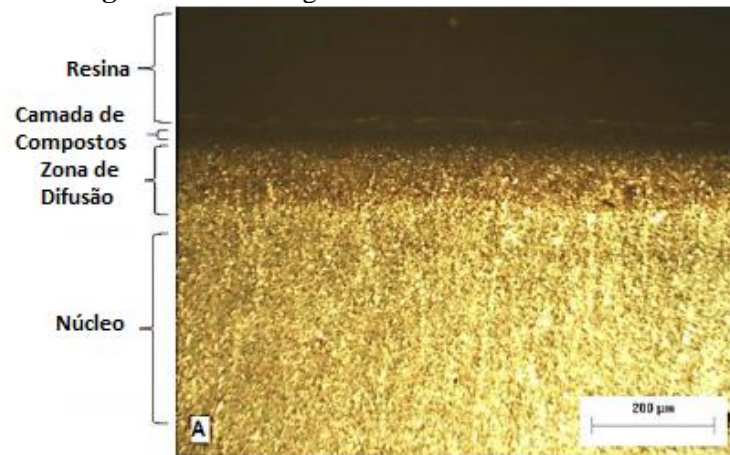
Figura 6– Mecanismo de formação da camada nitretada segundo Kölbell



Fonte: (ALVES JR, 2001)

A camada nitretada se divide em duas zonas, como pode ser observado na Figura 7, que mostra uma micrografia óptica do aço AISI M2 após nitretação. A zona mais interna, logo acima do núcleo, é chamada de zona de difusão e consiste em uma solução sólida de nitrogênio na matriz com alguns nitretos precipitados. A camada situada acima da zona de difusão é a camada de compostos, formada pelos nitretos Fe₄N e Fe₂₋₃N. (MELADO, 2011; WANG; YANG; WANG, 2017)

Figura 7– Morfologia da camada nitretada



Fonte: Adaptado de DE ARAÚJO (2015)

Na nitretação a plasma, a camada de compostos se forma antes da camada de difusão, enquanto na nitretação convencional essa camada só é formada depois da saturação da matriz, assim, a nitretação a plasma é mais dinâmica, pois a dissociação de compostos por bombardeamento ocorre paralelamente à formação de novos compostos. A maior velocidade da nitretação pode ser creditada à formação imediata de nitretos, que aumenta a concentração de nitrogênio muito acima dos valores observados na nitretação convencional. (ALVES JR, 2001)

A taxa de *sputtering* depende da pressão do gás, da composição da mistura, da tensão e da temperatura, modificando esses parâmetros é possível produzir camadas nitretadas com aspectos diferentes. Com o aumento da taxa de *sputtering*, haverá um consequente aumento do número de dissociações e defeitos na rede, assim espera-se um aumento na espessura da zona de difusão e diminuição da camada de compostos. (ALVES JR, 2001)

Em geral, as resistências ao desgaste e à corrosão podem ser aumentadas como o aumento da espessura da camada de compostos. (WANG; YANG; WANG, 2017)

Além da relação entre as espessuras da camada de compostos e da zona de difusão, pode-se modificar a relação entre as fases que constituem a camada de compostos. Camadas monofásicas apresentam propriedades mecânicas superiores com relação às camadas polifásicas, o que se deve a região de transição entre diferentes estruturas cristalinas das camadas polifásicas, que com a aplicação de tensões pode originar micro trincas. Uma camada monofásica ϵ - Fe_{2-3}N , tem maior resistência à corrosão, resistência ao deslizamento (*scuffing*) e maior dureza quando comparada à camada monofásica γ' - Fe_4N , mas possui maior coeficiente de atrito e menor ductilidade. (ALVES JR, 2001)

2.3 DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS

Filmes finos são materiais com espessura menor que alguns micrômetros, cuja formação pode ser dividida nas etapas de produção das espécies (atômicas, moleculares ou iônicas), o transporte destas espécies até o substrato, e a condensação sobre o substrato. (WASA; KITABATAKE; ADACHI, 2004)

Filmes finos são aplicados em diferentes setores industriais: microeletrônica, automotiva, médica, química, embalagens entre outras. Podem ser aplicados com objetivo de aumentar a dureza superficial e a resistência à corrosão, diminuir o atrito de componentes mecânicos e melhorar o aspecto ótico de bijuterias. (MACHUNO et al., 2016)

As técnicas de deposição são divididas em dois grupos principais: Deposição Química de Vapor - CVD e Deposição Física de Vapor - PVD (MERCHE; VANDENCASTEELE; RENIERS, 2012)

Na Deposição Química De Vapor - CVD, o precursor gasoso reage quimicamente com outra molécula ou com o substrato aquecido para criar a molécula a ser depositada. Os processos por CVD geralmente envolvem técnicas de fácil operação. A limitação, geralmente, está nas elevadas temperaturas de tratamento, que inviabilizam a deposição em substratos com baixo ponto de fusão ou em substratos metálicos submetidos a tratamento térmico antes da deposição. (MERCHE; VANDENCASTEELE; RENIERS, 2012; WASA; KITABATAKE; ADACHI, 2004)

Na Deposição Física De Vapor – PVD, são empregadas tecnologias de deposição que envolvem um processo físico para depositar revestimentos finos. As espécies que constituem o filme são arrancadas de uma fonte por evaporação ou por *sputtering*, podendo, ou não, combinarem-se com espécies ativas, posteriormente são condensadas sobre o substrato. Entre as diferentes técnicas de PVD pode-se destacar: a deposição por feixe de elétrons, a deposição por evaporação térmica e a deposição por pulverização catódica (*sputtering*). (INSPEKTOR; SALVADOR, 2014; MERCHE; VANDENCASTEELE; RENIERS, 2012; WASA; KITABATAKE; ADACHI, 2004)

Entre os processos de deposição física de vapor, as técnicas assistidas por plasma se destacam pela qualidade dos filmes depositados, baixo custo e controle do processo. A técnica de deposição adotada no presente trabalho, é a técnica de deposição por *sputtering* e, por esse motivo, exige um maior detalhamento.

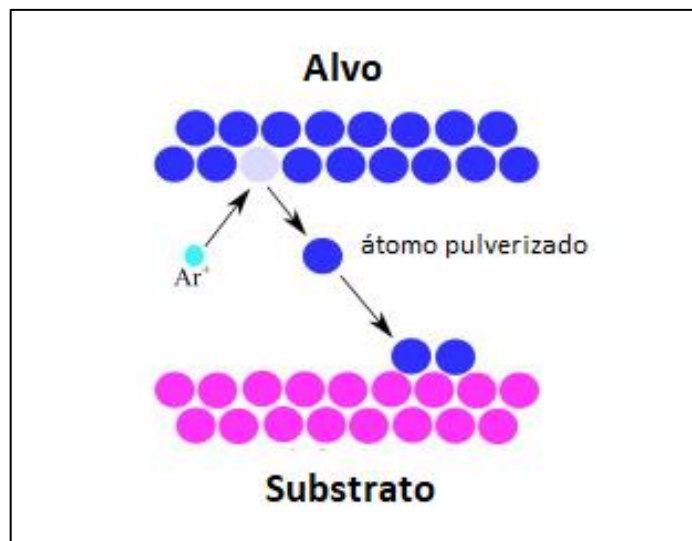
A adesão da camada depositada (filme fino), é melhorada quando é antecedida por um processo de nitretação, devido esta produzir uma camada de elevada dureza superficial que se

reduz de forma gradual na direção do núcleo, o que resulta em menores gradientes de tensão entre a camada depositada e o substrato, prevenindo assim a delaminação do filme. (BASHIR et al., 2017; ROUSSEAU et al., 2015)

2.3.1 Deposição por Pulverização Catódica (*Sputtering*)

Na deposição por pulverização catódica, representada na Figura 8, partículas em estado energético elevado (representadas por o argônio – Ar) bombardeiam uma superfície alvo, provocando a ejeção de átomos por transferência de momento. Posteriormente, esses átomos percorrem o espaço até o choque com o substrato, onde condensam-se. A maneira mais adequada de elevar o nível energético das partículas é pela ionização de um gás, através da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, gerando um plasma nas regiões intermediárias. (LIMA; GUARANY, 2006; WENDER et al., 2013; WESTWOOD, 1988).

Figura 8– Esquema representativo da deposição por pulverização catódica



Fonte: Adaptado de WENDER et al. (2013).

Os átomos pulverizados chegam ao substrato na forma atômica ou molecular e se difundem pela superfície. O filme começa a se formar a partir do aparecimento de ilhas no substrato, o crescimento e coalescimento dessas ilhas dá origem a um filme homogêneo, que aumenta de espessura a medida que mais átomos pulverizados chegam à superfície. (MACHUNO et al., 2016)

Um fator importante para a pulverização catódica é a pressão na câmara de vácuo. Ela deve ser baixa, para permitir a retirada de material do alvo e o seu deslocamento em direção ao

substrato. Mas deve ser alta o suficiente para permitir a manutenção do plasma através das colisões entre os átomos neutros e os elétrons secundários. (WENDER et al., 2013)

Além da pressão, os principais parâmetros que controlam o processo de pulverização catódica são a tensão, a corrente e a distância entre o alvo e o substrato. O ajuste desses parâmetros controla a taxa de pulverização catódica, velocidade dos átomos ejetados e permite a obtenção de filmes com características diferentes. (WENDER et al., 2013)

A aplicação da técnica de pulverização catódica a plasma depende do tipo de fonte utilizada. Se for utilizada fonte de tensão contínua, somente materiais isolantes poderão ser utilizados como alvos. Quando a fonte de tensão é alternada, podem ser utilizados materiais isolantes e condutores como alvo. (ALVES JR, 2001)

A deposição por pulverização catódica convencional é limitada por uma baixa taxa de deposição e baixa eficiência de ionização do plasma. O processo conhecido como *magnetron sputtering* permite superar essas limitações. A técnica utiliza um campo magnético com um pólo formado por um ímã posicionado no eixo central do alvo, o outro pólo é constituído por ímãs dispostos em forma de anel em torno do limite externo do alvo. Essa configuração aprisiona os elétrons secundários na região do alvo, aumentando a densidade do plasma nessas regiões e conseqüentemente as taxas de pulverização e deposição. (KELLY; ARNELL, 2000; WENDER et al., 2013)

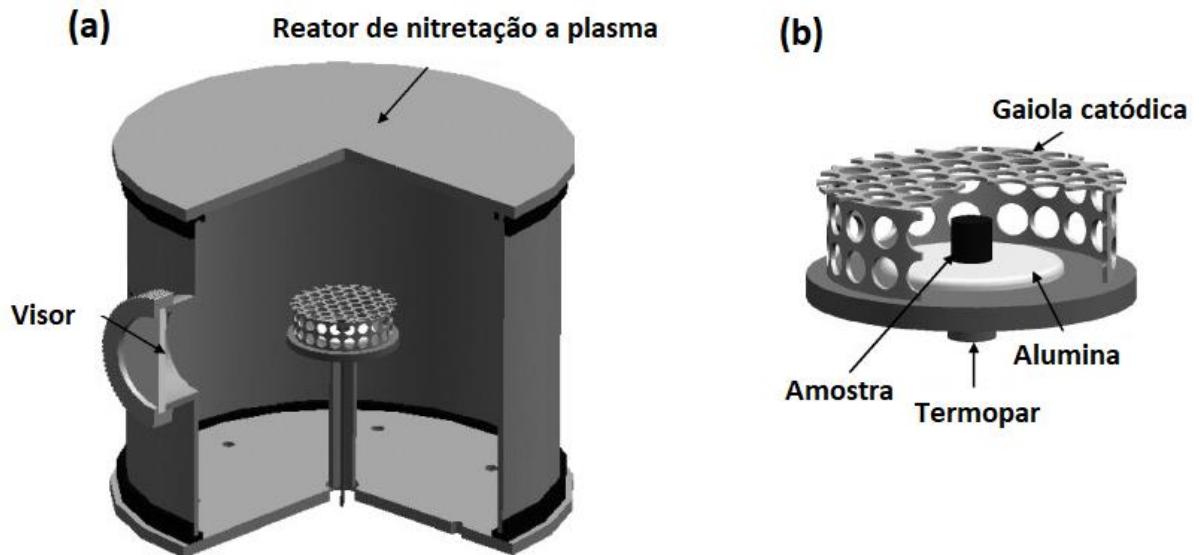
2.3.1.1 Deposição a plasma com gaiola catódica

A técnica de deposição a plasma com gaiola catódica foi desenvolvida por ALVES JR et al. (2006) e utiliza como alvo uma gaiola catódica (depósito de patente nº PI 0603213-3). A gaiola possui furos de diâmetro fixo e igualmente espaçados. A técnica baseia-se na utilização do efeito de multi-cátodo oco. (DAUDT et al., 2012; DE ARAÚJO et al., 2008; SOUSA et al., 2014)

A Figura 9 mostra a representação do equipamento utilizado na deposição com gaiola catódica. As amostras são posicionadas sobre um disco de alumina (que às mantêm isoladas do potencial catódico) e totalmente envolvidas pela gaiola catódica (em que é aplicado o potencial catódico), conforme representado na Figura 9 (b). Os átomos são arrancados da superfície da gaiola e se combinam com as espécies reativas do plasma, dando origem a compostos que se depositam na superfície das amostras. Assim, o material da gaiola depende da composição do filme que se deseja depositar. A técnica elimina problemas como o efeito de borda e o gradiente de temperatura (uma vez que o aquecimento da peça acontece através da transferência de calor

por radiação), possibilitando a obtenção de uma camada uniforme, independentemente da geometria da peça. (ALVES JR et al., 2006; DAUDT et al., 2012)

Figura 9 – Esquema representativo do equipamento de deposição a plasma com gaiola catódica.



Fonte: Adaptado de ALVES JR et al. (2006).

2.4 FURAÇÃO

A maior parte das peças produzidas na indústria manufatureira possui furos e apenas uma pequena parte desses furos é feito nas etapas de fundição, forjamento, sinterização e etc. Assim, a furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria. Normalmente é um processo final (a peça já passou por outras etapas de fabricação), portanto, a usinagem de furos fora da tolerância resulta em grandes perdas econômicas. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FIGUEIREDO, 2015).

A norma DIN 8589 define furação como um processo de usinagem com movimento de corte circular e com movimento de avanço na direção do eixo principal de rotação. (CASTILLO, 2005; FIGUEIREDO, 2015).

Segundo FERRARESI (1970), a furação é um processo mecânico de usinagem que utiliza uma ferramenta multicortante para obtenção de furos geralmente cilíndricos. Durante o processo, ocorre, simultaneamente, a rotação da ferramenta ou da peça (movimento de corte) e o deslocamento relativo entre a ferramenta e a peça, em uma trajetória retilínea de direção paralela ou coincidente com o eixo principal da máquina.

A furação engloba os processos de furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centro, alargamento cônico ou cilíndrico e trepanação. (FERRARESI, 1970; MARTINS, 2008). A ferramenta destinada ao processo denomina-se broca. Dentre os vários tipos de brocas existentes destacam-se as brocas helicoidais, as brocas canhão e as brocas BTA (*Broaching Trepaning Association*), sendo as primeiras as mais utilizadas. (DINIZ; MARCONDE; COPPINI, 2013; NOVASKI, 1996)

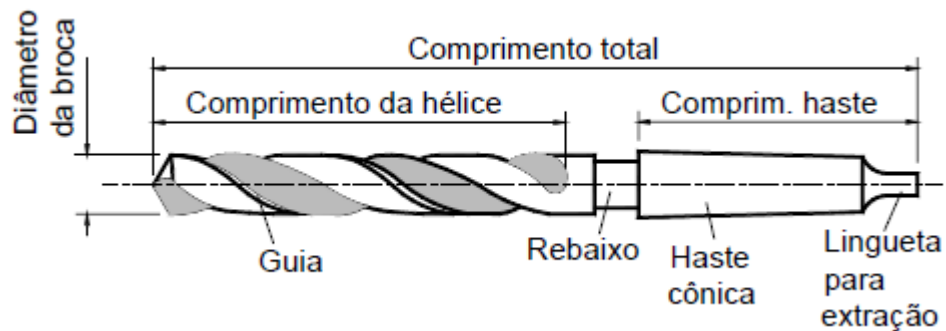
São desenvolvidas condições severas durante a operação de furação: a velocidade de corte não é linear (varia de zero no centro ao seu valor máximo na periferia da ferramenta), o suprimento de fluido de corte na região do gume da ferramenta é deficiente e a distribuição de calor provoca maior aquecimento nas quinas e cantos vivos da ferramentas, acelerando o desgaste nessas regiões (CASTILLO, 2005; FIGUEIREDO, 2015).

Com relação aos materiais utilizados na fabricação de ferramentas, o avanço, decorrente da utilização do metal duro não impacta o processo de furação significativamente como em outros processos de usinagem (torneamento e o fresamento). A usinagem com metal duro exige elevada velocidade de corte e em operações com brocas de pequeno diâmetro a rotação das máquinas não é suficiente para atingir essa velocidade. Outra limitação das ferramentas de metal duro está relacionada à profundidade dos furos. Em operações de furação profunda, a baixa tenacidade e resistência à flexão do metal duro são fatores que justificam a grande utilização de brocas de aço-rápido (HSS-High Speed Steel), que ainda é a ferramenta mais utilizada na furação. (DINIZ; MARCONDE; COPPINI, 2013; SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013)

2.4.1 Geometria da Broca

A Figura 10 apresenta a terminologia básica de uma broca helicoidal, que é composta por uma haste e uma parte cortante. Podem existir algumas variações geométricas, como a ausência de rebaixo (depende do tipo de fixação) e a presença de canais para refrigeração. A haste é a parte destinada à fixação da broca na máquina-ferramenta e dependendo do tipo de fixação pode ser cilíndrica ou cônica. A parte cortante (corpo útil da broca), refere-se ao comprimento helicoidal da ferramenta, onde podem ser identificadas as guias laterais e as superfícies de saída. Na extremidade da parte cortante encontra-se a ponta, que é a parte da broca responsável pela retirada do cavaco, é nela onde estão localizadas as arestas principais e transversais de corte.(DOS REIS, 2014; MOCELLIN, 2002).

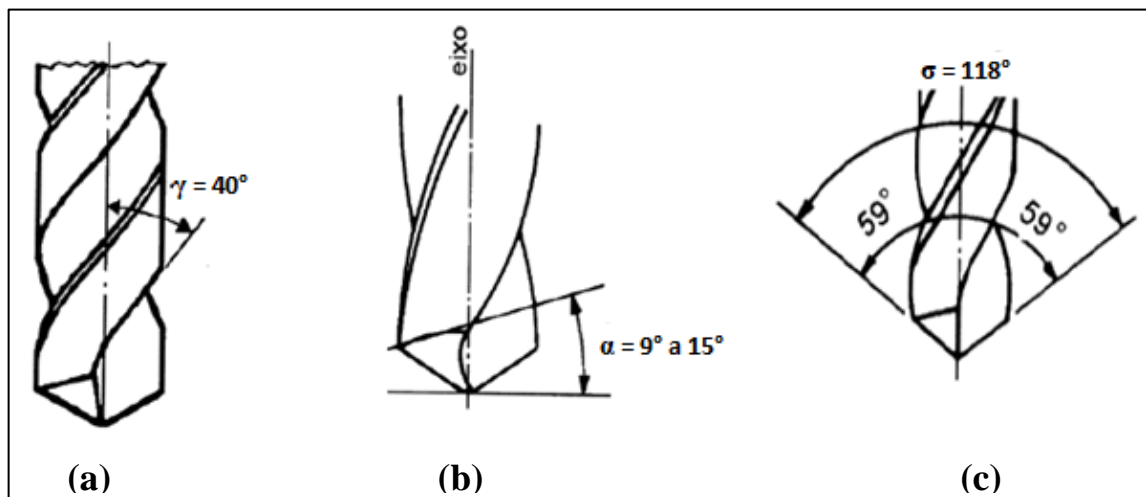
Figura 10 – Terminologia de uma broca helicoidal



Fonte: MOCELLIN (2002).

A geometria das brocas é caracterizada principalmente por seus ângulos de hélice, de folga e de ponta, representados na Figura 11.

Figura 11 – Ângulos de uma broca helicoidal: (a) ângulo de hélice – γ ; (b) ângulo de incidência ou folga - α ; (c) ângulo de ponta – σ .



Fonte: DOS REIS (2014)

O ângulo de Hélice (γ), representado na Figura 11 (a), é o ângulo entre a hélice e o eixo da broca e deve variar de acordo com o material a ser usinado, quanto mais duro o material, menor o ângulo de hélice. Ele auxilia no desprendimento do cavaco e no controle do acabamento e da profundidade do furo. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) classifica as brocas de acordo com o ângulo de hélice em tipo W, N e H. As brocas tipo W (do alemão *weich*=mole) são recomendadas para materiais que produzem cavaco longo, como as ligas de alumínio e magnésio. As brocas do tipo N (do alemão *normal*=normal) são as mais utilizadas, com aplicação na usinagem de materiais com dureza

média, como aços e ferro fundido. As ferramentas do tipo H (do alemão *hart*=duro) são recomendadas para furação de materiais que produzem cavaco curto, como o bronze, o baquelite e certos materiais plásticos.(DOS REIS, 2014; MOCELLIN, 2002)

O ângulo de incidência ou folga (α), representado na Figura 11 (b), tem como função reduzir o atrito e, dessa forma, facilitar a penetração da ferramenta. Assim como o ângulo de hélice varia de acordo com o material a ser usinado, quanto mais duro for o material menor é o valor do ângulo de incidência. Essa variação é delimitada entre seis e quinze graus. Se o ângulo de incidência for muito grande o apoio é deficiente e o gume da ferramenta quebra ou apresenta pequenos lascamentos. Se o ângulo for muito pequeno não há penetração de forma adequada e a ferramenta perde a afiação rapidamente. (CASTILLO, 2005; DOS REIS, 2014; MOCELLIN, 2002)

O ângulo de ponta (σ), representado na Figura 11 (c), é formado pelas arestas cortantes da broca e é determinado de acordo com a dureza do material usinado. Um grande ângulo de ponta permite o aumento do avanço, reduzindo o tempo de usinagem.(CASTILLO, 2005; DOS REIS, 2014)

É importante que as arestas de corte tenham o mesmo comprimento, formem o mesmo ângulo com eixo principal e estejam igualmente afiadas. Uma vez que a broca é uma ferramenta que trabalha em rotação, a falta de simetria entre as arestas causa um desbalanceamento, que aumenta o esforço de corte e pode causar a flexão da ferramenta, além da possibilidade de usinar furos fora da tolerância dimensional (DINIZ; MARCONDE; COPPINI, 2013).

2.5 DESGASTE

Desgaste é o dano devido à interação entre a superfície da ferramenta e a peça, geralmente inclui a perda ou transferência de material entre as superfícies em contato. Sua severidade depende da tensão entre as superfícies, da temperatura e da agressividade do ambiente (ASHBY; LIM, 1990; LIM, 2001; MELADO, 2011).

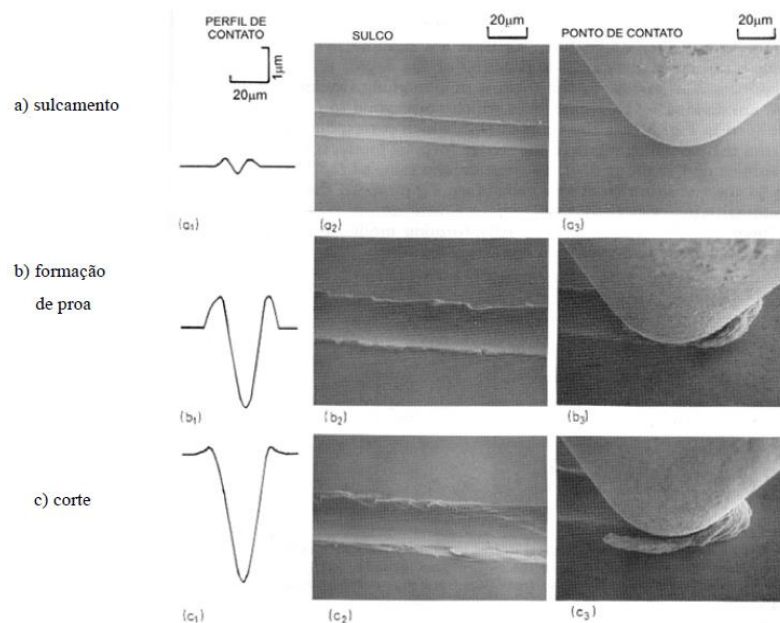
Apesar de raramente ser catastrófico, o desgaste reduz a eficiência e aumenta a taxa de substituição da ferramenta (LIM, 2001). Uma boa ferramenta deve resistir aos esforços a ela solicitados e ter a capacidade de realizar o maior número de operações de corte possíveis, essa capacidade está diretamente relacionada à resistência ao desgaste (MENDES, 2009)

Os principais mecanismos de desgaste são o de abrasão e adesão (deslizamento). Com menos frequência podem ser observados os mecanismos de desgaste por fadiga e corrosão. (ASHBY; LIM, 1990; MENDES, 2009)

O desgaste por fadiga ocorre devido ao grande número de repetições de movimento, enquanto que o desgaste corrosivo aparece em meios agressivos, com a produção de uma intercamada superficial a partir de reações triboquímicas, que por sua vez estão relacionadas com interações químicas e eletroquímicas (MENDES, 2009).

No desgaste abrasivo pode ser verificada a perda de material da superfície, esse é o tipo de desgaste mais comum em ferramentas de corte e está relacionado diretamente com a dureza dos materiais em contato e as condições de corte estabelecidas. As variações do desgaste por abrasão são representados na Figura 12 (ASHBY; LIM, 1990; MENDES, 2009).

Figura 12 – Tipos de desgaste por abrasão



Fonte: MENDES (2009).

O sulcamento é caracterizado por não gerar partículas de desgaste, parte do material é deslocado lateralmente devido à deformação plástica provocada pela pressão de contato. Na formação de proa o abrasivo penetra mais no componente de forma que o material se deforma plasticamente e é deslocado tanto lateralmente, como para frente do abrasivo, enquanto no corte a penetração já é bem maior e acaba gerando tensões maiores que podem levar à fratura do material. (MENDES, 2009)

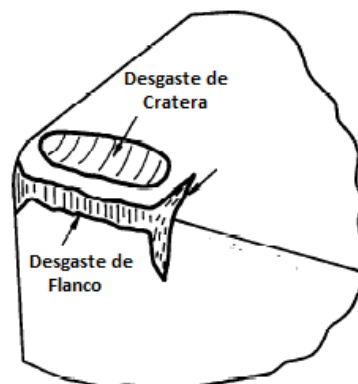
O desgaste adesivo se diferencia do desgaste abrasivo por não ter inicialmente uma partícula abrasiva entre a ferramenta e a peça. Durante o contato, parte do material mais mole (no caso a peça a ser usinada) se solta e é incorporada à superfície da ferramenta. Essa adesão prejudica o acabamento da ferramenta, fazendo com que a mesma apresente uma perda de

afiação da lamina de corte (formação de aresta postiça de corte - APC). Com o trabalho contínuo, a partícula pode ainda se desprender, levando consigo partes da ferramenta (ALVES, 2002; MENDES, 2009).

O desgaste por adesão predomina em baixas velocidades de corte, enquanto o desgaste por abrasão aumenta com o aumento da velocidade. O mecanismo dominante é aquele que leva à maior taxa de desgaste. A produtividade das ferramentas pode ser aumentada a partir da determinação das condições de corte associadas às menores taxas de desgaste, independentemente do mecanismo dominante. Para atender a essa necessidade pode-se utilizar os mapas de desgaste, que relacionam os parâmetros de corte com a taxa de desgaste. A maior contribuição desses mapas é a representação da zona de segurança, que corresponde à região do gráfico em que as taxas de desgaste são mínimas. (ASHBY; LIM, 1990; LIM, 1998; LIM et al., 1993; LIM; LIM, 2001).

Em uma ferramenta de corte o desgaste pode ser observado na forma de desgaste de flanco ou de cratera, conforme representado na Figura 13. O desgaste de flanco aumenta a força de corte e a temperatura na região de contato, aumentando a vibração na operação de corte e diminuindo a precisão dimensional das peças usinadas. O desgaste de cratera é observado com maior frequência no corte de aços e outros metais de elevado ponto de fusão e consiste no deslocamento de uma porção de material da ferramenta, originando uma cratera, trata-se de um dano mais severo que envolve deformação plástica e transferência de massa, a sua ocorrência depende do coeficiente de atrito, da distribuição de tensões e de como o material responde a essas tensões (LIM et al., 1993; MENDES, 2009)

Figura 13 – Tipos de desgaste mais comuns em ferramentas.



Fonte: Adaptado de (LIM et al., 1993).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Foram utilizadas oito brocas comerciais helicoidais de aço rápido – HSS sem revestimento superficial, Figura 14 (a), e duas com revestimento superficial, Figura 14 (b). Brocas sem revestimento foram submetidas aos tratamentos de nitretação convencional, nas temperaturas de 450°C e 500°C e tratamento duplex (nitretação seguida de deposição de TiN utilizando gaiola catódica de titânio), cada tratamento foi aplicado em duas ferramentas. As duas brocas sem revestimento restantes e as duas com revestimento comercial foram utilizadas como parâmetro de comparação. Segundo a classificação da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015), as brocas são do tipo N, com comprimento da hélice de 81 mm, comprimento total de 125 mm e diâmetro de 9 mm.

Figura 14– Brocas de aço rápido: (a) sem revestimento; (b) com revestimento



Fonte: Autoria própria (2018).

3.2 TRATAMENTO

Os tratamentos foram realizados em um reator da marca SDS Plasma. No domínio do Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma – LabPlasma, da Universidade Federal do Piauí – UFPI. A Figura 15 mostra uma imagem do reator utilizado no tratamento. O reator funciona com tensão máxima de 800 V.

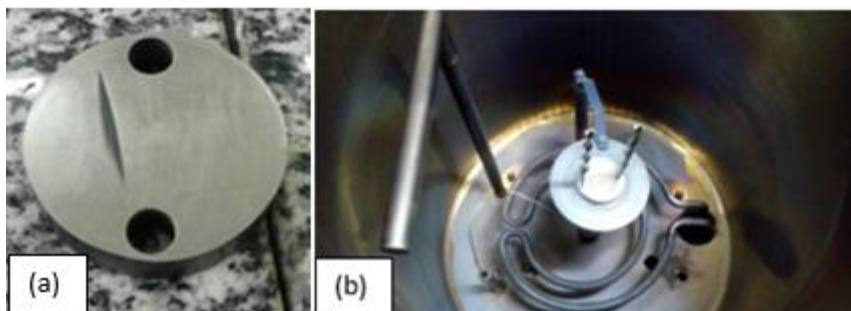
Figura 15 – Imagem do reator de nitretação a plasma do LabPlasma – UFPI.



Fonte: Autoria própria (2018).

Para o posicionamento das brocas sobre o porta-amostras foi utilizada uma base de aço carbono com 45 mm diâmetro e dois furos de 9 mm dispostos simetricamente em relação ao centro e com distância entre centros de 30 mm. A base utilizada pode ser visualizada na Figura 16 (a). A Figura 16 (b) mostra o posicionamento das brocas no porta-amostras antes do início do tratamento

Figura 16 – (a) Base de aço-carbono utilizada para dar suporte às brocas no reator; (b) Posicionamento das brocas para nitretação no reator.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.2.1 Limpeza das brocas, da base e das gaiolas catódicas

Antes da nitretação as brocas foram submetidas à limpeza química por imersão em uma solução com 90% de água destilada e 10% de HCl durante 100 segundos. Logo após, foram lavadas em água corrente e imersas em um recipiente com acetona no equipamento de ultrassom por 20 minutos. Depois da etapa da limpeza, as brocas foram secas com o auxílio de um secador.

A base utilizada para posicionar as ferramentas no reator foi lixada utilizando lixa d'água de granulometria 80 mesh. Em seguida foram lavadas com água corrente e imersas em acetona no equipamento de ultrassom por 20 minutos. Após a limpeza, a base foi seca com auxílio de um secador.

As gaiolas catódicas utilizadas na segunda etapa do tratamento duplex foram lixadas utilizando lixa d'água de granulometria 400 mesh. Em seguida foram imersas em uma solução com 5% de HF, 10% de HNO₃ e 85% de água destilada no equipamento de ultrassom por 20 minutos. A limpeza foi finalizada com a lavagem em água corrente, seguida da imersão em acetona e secagem com auxílio de um secador.

3.2.2 Nitretação convencional

A nitretação convencional foi realizada nas temperaturas de 450°C e 500°C. Essas temperaturas foram escolhidas com base em trabalhos como os de BORGIOLOI et al. (2005) e ZAGONEL et al. (2006), que mostraram que os tratamentos a partir de 450°C são mais eficientes no aumento da dureza superficial. A temperatura foi limitada superiormente a 500°C devido à instabilidade durante o aquecimento das brocas helicoidais à essas temperaturas no reator utilizado. Foi utilizada tensão alternada de 600 V.

No tratamento a 450 °C o pré-*sputtering* foi realizado a 350°C, com atmosfera composta por 50% de argônio e 50% de hidrogênio, duração de uma hora e pressão de 1 Torr. Após essa etapa a temperatura foi elevada para 450°C e a composição dos gases foi alterada para 75% de hidrogênio e 25% de nitrogênio. A pressão foi aumentada para 3 Torr, mantendo essas condições por 5 horas. Em seguida o reator foi desligado e o resfriamento das brocas até a temperatura ambiente ocorreu dentro da câmara de vácuo, portanto sem interação com a atmosfera externa.

No segundo tratamento de nitretação convencional a única diferença foi a temperatura de tratamento, ajustada para 500°C. As demais condições, incluindo a temperatura do pré-*sputtering* (350°C), a proporção dos gases, pressão e tempo de tratamento foram os mesmos do tratamento anterior.

3.2.3 Tratamento duplex

O tratamento duplex é dividido em duas etapas. A primeira delas é a nitretação, que foi realizada nas mesmas condições do tratamento à 500 °C descrito anteriormente. Na segunda etapa, foi realizada deposição utilizando a técnica de deposição com gaiola catódica, utilizando gaiola de titânio. Nessa segunda etapa o arranjo das brocas e da base foi montado dentro da gaiola de titânio e sobre um disco de alumina. A Figura 17 mostra a montagem na câmara de vácuo do reator. Na deposição, o pré-*sputtering* foi realizado a 350°C, com atmosfera composta por 50% de argônio e 50% de hidrogênio, duração de uma hora e pressão de 1 Torr. Em seguida, a temperatura foi elevada até 500°C, a atmosfera ajustada para composição de 75% de hidrogênio e 25% de nitrogênio. Na deposição a energia dos íons presentes no plasma diminui com o aumento da pressão, portanto, a eficiência do tratamento aumenta em pressões mais baixas (BILEK; MARTIN; MCKENZIE, 1998), nessa etapa a pressão utilizada foi de 1,24 Torr, que foi a menor possível dentro das limitações do equipamento e dos demais parâmetros de tratamento. Após alcançados os parâmetros estabelecidos para a deposição, o processo foi conduzido de maneira estável por 5 horas. Em seguida, o reator foi desligado e as brocas resfriadas no interior da câmara de vácuo até a temperatura ambiente.

Figura 17 – Montagem do arranjo para deposição com gaiola catódica.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.3 NOMENCLATURA

Foi adotada a seguinte nomenclatura para as brocas estudadas: broca comercial sem revestimento – CSR, broca comercial com revestimento – CCR, broca nitretada na temperatura de 450 °C – N450, broca nitretada na temperatura de 500 °C – N500 e broca submetida a tratamento duplex na temperatura de 500 °C – Duplex.

3.4 CARACTERIZAÇÃO

3.4.1 Corte

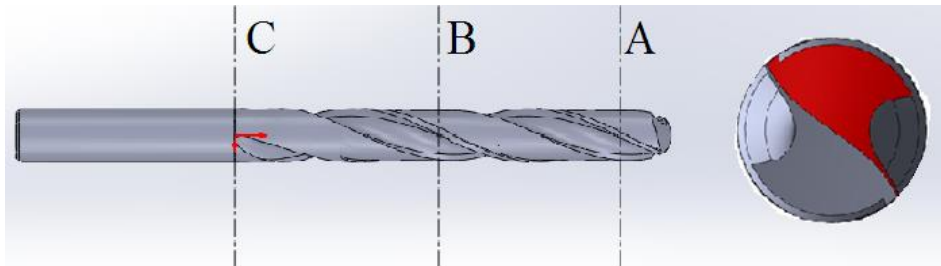
As amostras foram cortadas utilizando a cortadeira metalográfica da oficina mecânica do bloco de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

Foram cortadas amostras em três seções ao longo do corpo das brocas N450, N500 e CSR, para análise das superfícies transversais. Os cortes foram feitos nas seguintes regiões: próximo às arestas de corte (corte A), no meio do corpo da broca (corte B) e na junção entre o corpo e a haste (corte C), as posições são representadas na Figura 18. Foi retirada apenas uma amostra transversal (corte A) da broca Duplex, considerando que, segundo SOUSA et al. (2007) não há formação de gradiente de temperatura em peças mantidas em potencial flutuante durante tratamento em gaiola catódica, assim, durante a deposição a temperatura é a mesma em

todas as regiões da broca. Na broca CCR também foi estudada apenas a região do corte A, porque ela é utilizada apenas como parâmetro de comparação e estudar as características do seu tratamento não é a finalidade deste trabalho.

Além das amostras transversais, foi cortada em cada broca uma amostra com a superfície de folga (destacada na vista superior representada na Figura 18 para medição da dureza superficial).

Figura 18 – Regiões estudadas (Cortes A, B, C e superfície de folga).



Fonte: Autoria própria (2018).

3.4.2 Ensaios de Microdureza

As medidas de microdureza na escala Vickers foram obtidas utilizando o microdurômetro da marca INSIZE, modelo ISH-TDV 1000, pertencente ao Laboratório de Metalografia do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí – UFPI.

Para avaliar a dureza na superfície de folga das brocas, foram realizadas dez medidas em cada amostra e calculada a média aritmética das 10. A carga utilizada foi de 0,2 kgf, com tempo de aplicação de 15 segundos.

Para análise de dureza do núcleo nas amostras transversais (Cortes A, B e C), 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 segundos.

3.4.3 Preparação Metalográfica

Após o corte, as amostras foram embutidas em baquelite, utilizando uma máquina de embutimento a quente. Em seguida, foram lixadas com lixas d'água com granulometria de 80, 150, 180, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Posteriormente, foram submetidas a polimento mecânico em disco de feltro com pasta de diamante de granulometria de 3 μm e 1 μm . Após o polimento, as amostras foram atacadas quimicamente por imersão em solução de Nital 4% (4%

de ácido nítrico e 96% de álcool etílico PA) o tempo de imersão variou entre 6 e 9 segundos. Logo após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente, imersas em álcool etílico e secas com auxílio de um secador, evitando a formação de óxidos naturais.

3.4.4 Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

As imagens microestruturais das amostras transversais foram obtidas com aumento de 500 vezes, utilizando um Microscópio Óptico Zeiss, modelo AxioCam ICC 5 e software AxioVs40x64 V4.9.1.0, no domínio da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Para avaliar a camada de compostos, foram obtidas imagens das amostras transversais com ampliação de 5000 vezes, utilizando o microscópio eletrônico de varredura – MEV modelo Vega XMU, da marca Tescan, no domínio da Universidade Federal do Ceará - UFC.

3.4.5 Análise de Desempenho

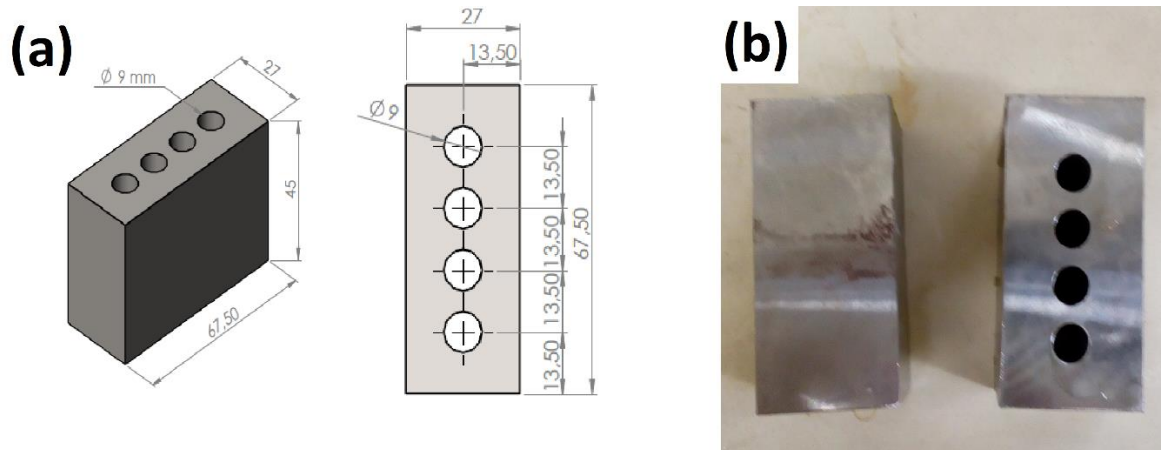
A simulação de desempenho foi realizada em um Centro de Usinagem por Comando Numérico – CNC, modelo D600, da marca Romi, no domínio do Instituto Federal do Piauí - IFPI.

3.4.5.1 Corpo de Prova

Para os testes de usinagem foi adotado o aço SAE1045, um aço de médio carbono, de custo relativamente baixo e amplamente utilizado na indústria (GU et al., 2013; SHEIKH et al., 2015).

O corpo de prova foi modelado no software SolidWorks e pode ser visualizado na Figura 19 (a). As dimensões foram determinadas respeitando as características de operação de furação profunda, profundidade de pelo menos 5 vezes o diâmetro (MARQUES et al., 2015; SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013) e o cuidado com as distâncias mínimas entre furos e entre os furos e as bordas do corpo de prova, que devem ser de, pelo menos, 1,5 vezes para que não influencie nos resultados (RODRIGUES et al., 2015). Cada corpo de prova tinha disponibilidade para 4 furos (número de furos feitos entre duas medidas de desgaste consecutivas). A Figura 19 (b) mostra dois corpos de prova, um antes e um após a usinagem.

Figura 19 – (a) Corpo de prova modelado no SolidWorks; (b) Corpos de prova antes e após furação.



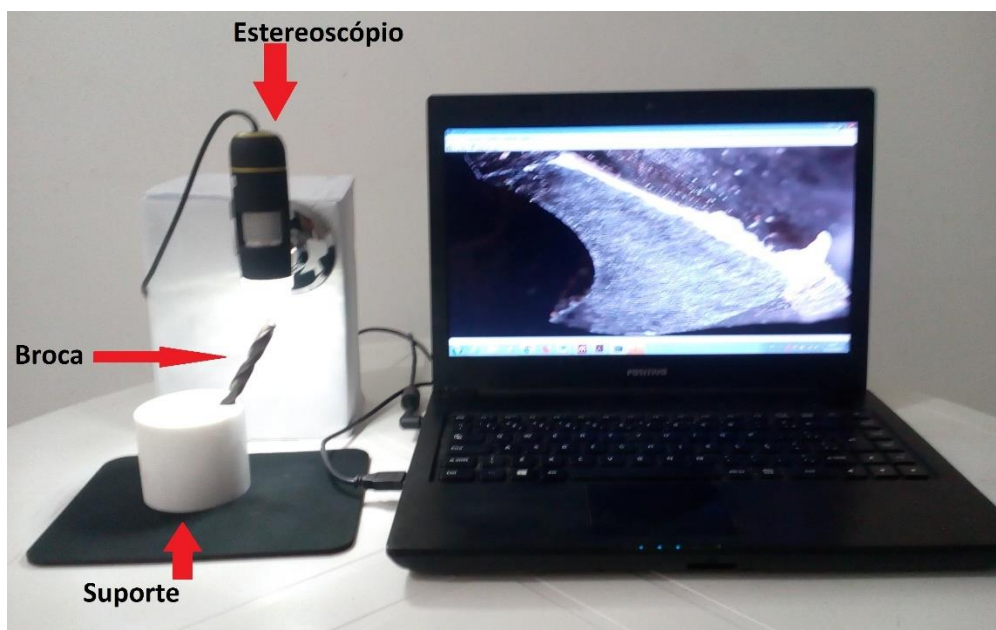
Fonte: Autoria própria (2018).

3.4.5.2 Critérios de Parada

Foram adotados quatro critérios de parada: o desgaste de flanco máximo “ $V_{Bm\acute{a}x}$ ” 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 à limitação de material para usinagem dos corpos de prova). Sendo determinante o que ocorrer primeiro.

A cada bloco usinado (4 furos), a broca foi retirada para verificação do desgaste de flanco. Foi utilizado um estereoscópio óptico modelo SZ-EWS-I007160 mostrado na Figura 20, com conexão USB e software para aquisição de imagens. Em seguida, as imagens foram medidas utilizando o software ImageJ com a ferramenta de conversão de pixels para milímetros. Para o posicionamento adequado da aresta de corte (perpendicular ao aparelho) foi confeccionado um suporte com um furo feito com ângulo de 31° . A Figura 20 mostra o posicionamento de uma das brocas no suporte.

Figura 20 – Equipamento utilizado para aquisição de imagens das arestas de corte das brocas.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.4.5.3 Programa CNC e Parâmetros de Usinagem

O ensaio de furação foi realizado com velocidade de corte de 20 m/min (que resulta em uma rotação de 707,7 RPM) e avanço de 0,19 mm/volta. Esses parâmetros de corte foram definidos consultando os valores sugeridos em catálogos técnicos para usinagem de aço carbono de elevada resistência (acima de 27 HRC) (AMATOOLS, 2017; OSG SULAMERICANA, 2017). A utilização de fluido de corte é importante para reduzir os esforços devido ao atrito na interface ferramenta/peça durante as operações de usinagem (SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013). Foi utilizado fluido de corte em abundância. O fluido utilizado é o Maxlub SO EP da fabricante Bradahl,, diluído em água com concentração de 1 para 20 (1 de fluido para 20 de água).

As operações em um centro de usinagem CNC são comandadas por um programa na linguagem G (linguagem de programação desenvolvida especialmente para o comando de máquinas CNC). O programa foi obtido a partir da integração entre as plataformas CAD e CAM do SolidWorks, que permite obter a programação da operação a partir do modelo em 3D desenvolvido na plataforma de desenho, acrescentando como dados de entrada os parâmetros de corte consultados nos catálogos.

A medida que aumenta a profundidade dos furos, a operação de furação tende a ficar instável, devido à dificuldade de remoção do cavaco e de suprimento de fluido de corte. Uma

solução para melhorar a estabilidade da operação e que contribui tanto para o aumento da vida útil das ferramentas como para garantir a qualidade dos furos usinados, é a utilização de avanço intermitente (avanço pica-pau) (SANTOS; KIECKOW; CASARIN, 2013). Segundo KIM et al. (2009) o avanço de cada etapa (OSFL- *One-Step Feed-Length*) adequado fica em torno de um décimo do diâmetro da broca. Nesse trabalho foi adotado um OSFL de 1,0 mm, que chega bem próximo dessa relação para a broca de 9,0 mm.

3.4.5.4 Medição dos Furos

Os furos foram medidos utilizando um projetor de perfil modelo ISP-Z3015, da marca Insize, pertencente ao Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Piauí – UFPI. Foi utilizada a função “CIRCLE”, que mede o diâmetro a partir da indicação de três pontos. As medidas foram utilizadas para verificação da tolerância dimensional. Segundo a fabricante de ferramentas DORMER (2015) 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 (1995) são, respectivamente, 9,000 mm e 9,150 mm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

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 direção 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aghajani, H.; Torshizi, M.; Soltanieh, M. (2017). A new model for growth mechanism of nitride layers in plasma nitriding of AISI H11 hot work tool steel. *Vacuum*, 141, 97–102.

Ait Gougam, L.; Tribeche, M. (2011). Debye shielding in a nonextensive plasma. *Physics of Plasmas*, 18, 062122 1-6.

Ali, M.; Hamzah, E.; Radzi Toff, M. (2008). Friction coefficient and surface roughness of TiN-coated HSS deposited using cathodic arc evaporation PVD technique. *Industrial Lubrication and Tribology*, 60, 121–130.

Alves, C. A. F. C. (2002) Estudo da nitretação a plasma aplicada em ferramentas para fresamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Alves Jr, C. (2001). *Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações*. Natal: EDFRN.

Alves Jr, C. et al. (2006). Use of cathodic cage in plasma nitriding. *Surface & Coatings Technology*, 201, 2450–2454, 2006.

AMATOOLS. (2017). *Tabela_de Velocidade_de_Corte_para_Brocas*. Disponível em: <[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)> Acesso em: 15 dez. 2017.

Ashby, M. F.; Lim, S. C. (1990). Wear-mechanism maps. *Metallurgica et Materialia*, 24, 805-810.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995) *NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). *ABNT NBR ISO 5419: Brocas helicoidais - Termos, definições e tipos*. Rio de Janeiro.

Baptista, A. L. de B. (2002) Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. *Revista Escola de Minas*, 55, 103–109.

Baptista, E. A.; Coppini, N. L. (2001). Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem com Auxílio de Sistema Especialista. In: *XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção-ENEGEP e VI International Conference of Industrial Engineering and Operations Management-ICIEOM*. 2001, 225-232.

Bashir, m. I. et al. (2017). Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 327, 59–65.

Bhaskar, S. V.; Kudal, H. N. Tribology of nitrided-coated steel-a review. *Archives of Mechanical Technology and Materials*, 37, 50–57.

Bilek, M. M. M.; Martin, P. J.; Mckenzie, D. R. (1998). Influence of gas pressure and cathode composition on ion energy distributions in filtered cathodic vacuum arcs. *Journal of Applied Physics*, 83, 2965–2970.

Borgioli, F. et al. (2005). Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: Influence of treatment temperature. *Surface and Coatings Technology*, 200, 2474–2480.

Burm, K. T. A. L. (2012). Plasma: The fourth state of matter. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 32, 401–407.

Cavaliere, P.; Perrone, A.; Silvello, A. (2016). Multi-objective optimization of steel nitriding. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 292–312.

Castillo, W. J. G. (2005). Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.

Chen, H. Y.; Stock, H. R.; Mayr, P. (1994) Plasma-Assisted Nitriding of Aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 64,139–147.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA-CNI. *ECONOMIA BRASILEIRA Edição Especial do Informe Conjuntural*. Disponível em:
<<http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2017/2/economia-brasileira/#economia-brasileira-2017>>. Acesso em: 23 dez. 2017.

Czerwiec, T. U.; Renevier, N.; Michel, H. (2000) Low-temperature plasma-assisted nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 131, 267–277.

Daudt, N. de F. et al. (2012) TiN thin film deposition by cathodic cage discharge : effect of cage configuration and active species TiN thin film deposition by cathodic cage discharge : effect of cage configuration and active species. *Journal of Physics: Conference Series*, 406, 1–7.

De Araújo, A. G. F. (2015). Influência da Temperatura na Nitretação Iônica Aplicada a Ferramentas de Corte de Aço AISI M2. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Piauí.

De Araújo, F. O. et al. (2007). Nitretação a Plasma De Aço Inoxidável Austenítico AISI316. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 26, 31–35.

De Araújo, F. O. et al. (2008). Deposição de filme metálico em amostras de vidro em gaiola catódica. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 27, 149–152.

De Araújo, A. G. F. (2015). Influência da Temperatura na Nitretação Iônica Aplicada a Ferramentas de Corte de Aço AISI M2. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Piauí.

De Sousa, R. R. M. et al. (2007). Cathodic cage nitriding of samples with different dimensions. *Materials Science and Engineering A*, 465, 223–227.

De Sousa, R. R. M. et al. (2008). Uniformity of temperature in cathodic cage technique in nitriding of austenitic stainless. *Surface Engineering*, 24, 313–318.

Diniz, A. E.; Marconde, F. C.; Coppini, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. (8th ed.). São Paulo: Artliber.

DORMER. (2015). *Catálogo catalogue*. Disponível em: <https://www.dormerpramet.com/downloads/dorcatalogue2015_v5_en.pdf>. Acesso: 12 dez. 2017.

Dos Reis, A. (2014). Estudo do Emprego de Broca Especial em Substituição ao Alargador na Produção de Furos em Ferro Fundido Vermicular. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.

Ferraresi, D. (1970). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. (1th ed.) São Paulo: Edgard Blücher LTDA.

Ferreira, L. M.; Brunatto, S. F.; Cardoso, R. P. (2015). Martensitic Stainless Steels Low-temperature Nitriding : Dependence of Substrate Composition. *Materials Research*, 18, 622–627.

Fesahat, M.; Soltanieh, M.; Eivani, A. R. (2016). Effect of plasma nitriding on nanostructure of TRD coating. *Surface Engineering*, 32, 547–553, 2016.

Figueiredo, M. T. Estudo da Influência da Geometria de Broca de Metal-Duro na Qualidade do Furo Realizado em Ferro Fundido Nodular. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Grün, R.; Günter, H.-J. (1991) Plasma nitriding in industry - problems, new solutions and limits. *Materials Science and Engineering*, 140, 435–441.

Gu, K. Et Al. (2013). Electrochemical corrosion and impedance study of SAE1045 steel under gel-like environment. *Corrosion Science*, 74, 408–413.

Hiraoka, Y.; Watanabe, Y.; Umezawa, O. (2016). Effect of Nitriding Temperature and Compositions on Diffusion Layer's Hardness in Gas Nitrided Low Alloy Steel Containing Chromium. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 80, 253.

Hosseini, S. R.; Ahmadi, A. (2013). Evaluation of the effects of plasma nitriding temperature and time on the characterisation of Ti 6Al 4V alloy Vacuum. *Elsevier*. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X12003314>> Acesso: 08 dez. 2017.

Inspektor, A.; Salvador, P. A. (2014). Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. *Surface and Coatings Technology*, 257, 138–153.

Kelly, P. J.; Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering : a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56, 159–172.

Kim, D. W. et al. (2009). Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 246–255.

Kishurov, V. M. Et Al. (2012). Influence of Wear-Resistant Coatings on Tool Performance. *Russian Engineering Research*, 32, 182–185.

Klein, A. N. et al. (2013). Plasma Science and Technology Related content DC Plasma Technology Applied to Powder Metallurgy : an Overview. *Plasma Science and Technology*, v 15, 70-81.

Larisch, B.; Brusky, U.; Spies, H. (1999). Plasma nitriding of stainless steels at low temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 116–119, 205–211.

Lepicka, M.; Gradzka-Dahlke, M. (2016) Direct Current and Pulsed Direct Current Plasma Nitriding of Ferrous Materials A Critical Review. *Acta Mechanica et Automatica*, 10, 150–158.

Li, Y. et al. (2010). Plasma nitriding of 42CrMo low alloy steels at anodic or cathodic potentials. *Surface & Coatings Technology*, 204, 2337–2342.

Li, Y. et al. (2017). Wear and corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 329, 184–192.

Lim, S. C. et al. (1993). Wear maps for uncoated steel cutting tools. *Wear*, 170, 137–144.

Lim, S. C. (1998). Recent developments in wear- mechanism maps. *Tribology International*, 31, 87–97.

Lim, S. C.; Lim, C. Y. H. (2001). Effective use of coated tools - the wear-map approach. *Surface and Coatings Technology*, 139, 127–134.

Lima, A. C.; Ferraresi, V. A. (2009). Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. *Soldagem e Inspecao*, 14, 140-150.

Lima, E. C.; Guarany, C. A. (2006). Construção de um Sistema de Pulverização Catódica DC de Baixo Custo. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 25, 203–208.

Lima, J. A.; Alves Jr, C.; Dos Santos, C. A. (2005). Estudo do Gradiente Térmico no Processo de Nitretação a Plasma Thermal Gradient Study in the Plasma Nitriding Process. *Revista Matéria*, 10, 273–283.

Machuno, L. G. B. et al. (2016). Desenvolvimento e avaliação de uma fonte DC de alta tensão para utilização em sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica. *Revista Matéria*, 21, 492–500.

Marcomini, J. B.; Goldenstein, H. (2012). Nova Liga Fe-C-Mn-Si-Cr Para Rolamentos : Curvas De New Fe-C-Mn-Si-Cr Bearing Alloy : Tempering Curves. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 9, 324–329.

Marques, F. M. Et Al. (2015). Caracterização e Desgaste de Brocas de HSS Revestidas Com AlCrN e não Revestidas , em Ensaio de Furação , na Usinagem de Ferro Fundido Nodular DIN GGG 50. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 19, 87–104.

MARTINS, P. S. (2008). Avaliação dos Sistemas de Fixação Hidráulico e Térmico de Broca de Metal Duro em Furação do Cabeçote do Motor Fire. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Melado, A. C. (2011). Influência dos Parâmetros de Nitretação a Plasma na Resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço Ferramenta AISI H13. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo.

Mendes, M. A. R. S. M. (2009). Estudo do Desgaste de Ferramentas com e sem Revestimentos de Filmes Finos Utilizadas em Operações de Conformação a Frio. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo.

Merche, D.; Vandencastele, N.; Reniers, F. (2012). Atmospheric plasmas for thin film deposition: A critical review. *Thin Solid Films*, 520, 4219–4236.

Merklein, M.; Svec, T. (2013). Hot stamping: manufacturing functional optimized components. *Production Engineering*, 7, 141–151.

Mocellin, F. (2002) Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

Naeem, M. et al. (2017). Improved surface properties of AISI-304 by novel duplex cathodic cage plasma nitriding. *Materials Letters*, 189, 213–216.

NII, H.; NISHIMOTO, A. (2012). Surface modification of ferritic stainless steel by active screen plasma nitriding. *Journal of Physics*, 379, 1–7.

Novaski, O. (1996). Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais. Tese de Livre Docência em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas.

OSG SULAMERICANA. (2017). *Brocas*. Disponível em:
<https://internacionalferramentas.com.br/fornecedores/osg/osg_brocas.pdf> Acesso: 12 dez.

2017.

Pinedo, C. E. (2004). Tratamentos Superficiais para Aplicações Tribológicas. *Metalurgia e Materiais*, 60, 162–164.

Pinedo, C. E. (2004). Tratamento Térmico e Superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte II - Tratamento Superficial. *Heattech*, p. 293–301.

Pinedo, C. E.; Magnabosco, R. (2015). Mecanismos de Nitretação sob Plasma do Aço Inoxidável Martensítico Aisi 420 Nitretado a Alta e Baixa Temperatura. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 12, 257–264.

Pinedo, C. E.; Monteiro, W. A. (2011). Influence of heat treatment an endurecimento secundário. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 8, 86–90.

Prass, A. R.; Fontana, L. C.; Recco, A. A. C. (2017). Nitretação por plasma com revenimento simultâneo do aço ferramenta VF 800AT. *Revista Materia*, 22.

Rodrigues, J. R. P. et al. (2015). Study of the application of sunflower oil in the process of drilling ABNT 1045 steel/Estudo da aplicacao do oleo de girassol no processo de furacao do aco ABNT 1045. *Acta Scientiarum Technology*, 19, 87–104.

Rousseau, A. F. et al. (2015). Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 High Speed Steel tools. *Surface and Coatings Technology*, 272, 403–408.

Saeed, A. et al. (2013). Validity of “sputtering and re-condensation” model in active screen cage plasma nitriding process. *Applied Surface Science*, 273, 173–178.

Santos, W. C. et al. (2015). Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. *Revista Materia*, 2020, 304–315.

Santos, E. M. dos; Kieckow, F.; Casarin, J. J. (2013). Avaliação do Desgaste de Brocas Helicoidais de Aço-Rápido (Hss) Modificadas Superficialmente por Nitretação a Plasma. *Revista Eletrônica de Extensão da URI*, 9, 68–76.

She, D. et al. (2015). Effects of nitriding temperature on microstructures and vacuum tribological properties of plasma-nitrided titanium. *Surface and Coatings Technology*. 264, 32-40.

Sheikh, M. A. et al. (2015). Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA. *Simulation Modelling Practic and Theory*, 59, 36–51.

Sousa, R. R. M. De et al. (2014). Nitriding of AISI 1020 Steel : Comparison Between Conventional Nitriding and Nitriding with Cathodic Cage. *Materials Research*, 17, 708–713.

Steiner, T.; Mittemeijer, E. J. (2016). Alloying Element Nitride Development in Ferritic Fe-Based Materials Upon Nitriding: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 2091–2102.

Wang, E.; Yang, H.; Wang, L. (2017). The thicker compound layer formed by different NH₃-N₂mixtures for plasma nitriding AISI 5140 steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 725, p. 1320–1323.

Wasa, K.; Kitabatake, M.; Adachi, H. (2004). *Thin Film Materials Technology: Sputtering of Compound Materials*: Springer.

Wender, H. et al. (2013). Sputtering deposition of nanoparticles onto liquid substrates: Recent advances and future trends. *Coordination Chemistry Reviews*, 257, 2468–2483.

Westwood, W. D. (1988). Sputter Deposition Processes. *MRS Bulletin*, 13, 46–51.

Wisell, H. L. (1981). High Speed Steel. US 4276085.

Xavier, M. D. (2011). Precipitados em Aços Rápidos e em Aços Inoxidáveis para Válvulas de

Motores. *Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do Senai-SP*, 5, 1–10.

Zagonel, L. F. et al. (2006). Influence of the process temperature on the steel microstructure and hardening in pulsed plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 201, 452–457.

Zapata, G. M.; Button, S. T. (2015). Austenita na Estampagem a Quente Diferencial dos Aços Endurecíveis ao Boro DIN 22MNB5 E Din 27MNCRB5. In: *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Salvador-Ba, n. 1, 2015.

Zhao, C. et al. (2006). Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism. *Surface and Coatings Technology*, 201, 2320–2325.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estudar a aplicação de nitretação a plasma em brocas de aço rápido utilizando a técnica de gaiola catódica;
2. Aplicar o tratamento duplex em brocas de aço rápido variando a composição dos filmes finos;
3. Estudar a condição de nitretação que proporciona a melhor adesão dos filmes de TiN no tratamento duplex;
4. Estudar a influência da aplicação de nitretação e tratamentos duplex no desempenho de brocas de aço rápido em operações de furação a seco.
5. Estudar o desempenho de brocas nitretadas na usinagem de ferro fundido.