

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

CLEITON FISCHER

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE
AÇO RÁPIDO BORETADAS E BORETADAS+TiN NA
FURAÇÃO A SECO**

JARAGUÁ DO SUL, ABRIL DE 2016.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

**CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

CLEITON FISCHER

**AVLIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO
RÁPIDO BORETADAS E BORETADAS+TiN NA FURAÇÃO A SECO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos de obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Professor Orientador: Alexandre Galiotto, Me.

JARAGUÁ DO SUL, ABRIL DE 2016

F529a Fischer, Cleiton

Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido boretadas e boretadas+TiN na furação a seco / Cleiton Fischer; orientador Alexandre Galiotto. – Jaraguá do Sul, SC, 2016. 69 f.

Monografia (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Brocas. 2. Aço rápido. 3. Boretção. 4. Desgaste de flanco. I. Galiotto, Alexandre. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

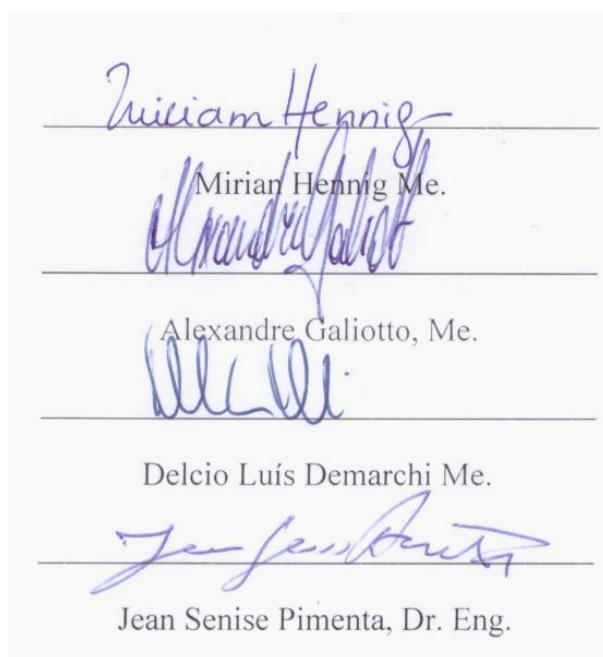
AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RÁPIDO BORETADAS E BORETADAS+TiN NA FURAÇÃO A SECO.

CLEITON FISCHER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso Tecnólogo em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 01 de abril de 2016.

Banca Examinadora:



Miriam Hennig
Miriam Hennig Me.

Alexandre Galiotto
Alexandre Galiotto, Me.

Delcio Luis Demarchi
Delcio Luis Demarchi Me.

Jean Senise Pimenta
Jean Senise Pimenta, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde.

Aos meus pais, pelo incentivo.

À minha noiva Cíntia Fischer, pela dedicação e paciência.

Aos meus amigos do IFSC, pelos momentos de estudo e companheirismo, e, especial a Robson Scarmagnani.

Ao professor orientador Alexandre Galiotto Me., pelo aprendizado e dedicação.

À professora Miriam Hennig, Me., pela dedicação e orientações na realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus.

Muito obrigado!

RESUMO

A crescente demanda pela melhoria superficial de ferramentas na usinagem, principalmente a melhoria superficial de brocas traz consigo a necessidade da aplicação de novos revestimentos superficiais alinhados à análise de parâmetros e desgastes. Os revestimentos de boretação e o revestimento de boretação+TiN são apresentados como novas alternativas para auxiliar na constante busca da melhoria superficial. Este trabalho tem por objetivo avaliar o desgaste nas brocas de aço rápido com o tratamento de boretação (monocamada) e boretação mais revestimento de TiN (multicamada), comparando o desgaste com o das brocas sem revestimento e brocas com revestimento de TiN, ensaiadas em laboratórios de materiais e de usinagem. O processo de furação executou-se a seco (sem lubrificação) no ferro fundido cinzento SAE G3500 (classe FC 300). Os parâmetros trabalhados foram as velocidades de corte de 20m/min e 35m/min, com avanços de 0,1mm/rot e 0,2mm/rot. Foram empregados parâmetros de quantificação de desgaste de flanco, critérios de fim de vida de 90 furos ou falha catastrófica. Houve também ensaios de adesividade dos revestimentos, de dureza das brocas e de caracterização das camadas. Os resultados mostram que houve influência dos parâmetros de corte para todos os tipos de brocas e que a aplicação do tratamento de boretação nas brocas não proporcionou redução de desgaste. Verificou-se que a estrutura foi afetada, além de haver mecanismos de desgastes e avarias no processo de usinagem, os quais ocasionaram uma redução significativa da vida útil dessas ferramentas.

PALAVRAS-CHAVE: Brocas. Aço rápido. Boretação. Desgaste de flanco. Furação.

ABSTRACT

The growing demand for surface enhancement tools in machining, mainly superficial improvement drills brings with it the need for application of new surface coatings aligned with the analysis parameters and wear. The boronizing coatings and coating TiN + boriding are presented as alternatives to further aid in constant search of the surface improvement. This study aims to evaluate the wear on the high speed steel drills with the treatment of boriding (monolayer) and boronizing more coating TiN (Multilayer), comparing the wear with the drills uncoated drills with TiN coating, tested in laboratories in materials and machining. The drilling process performed to dry (no lubrication) in gray cast iron SAE G3500 (Class FC 300). The parameters were worked cutting speed of 20m / min and 35m / min, with advances of 0.1 mm / rev and 0.2 mm / rev. Were employed flank wear quantization parameters, end of life 90 holes or catastrophic failure criteria. There was also adhesion assays coatings, hardness of drills and characterization of layers. The results show that there was an influence of cutting parameters for all types of drills and the application of boriding treatment in drills did not provide wear reduction. It was found that the structure was affected, and there are mechanisms of wear and faults in the machining process, which caused a significant reduction in the useful life of tools.

Keywords: Drills. High speed steel. Boriding. Flankwear. Hole drilling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Processos de fabricação	19
FIGURA 2: Tipos de furação	21
FIGURA 3: Tipos de brocas	21
FIGURA 4: Descrição dos componentes estruturais das brocas helicoidais com haste cônica .	23
FIGURA 5: Descrição dos aspectos da ponta de uma broca helicoidal	23
FIGURA 6: Partes complementares das brocas helicoidais	24
FIGURA 7: Falhas em ferramentas de corte	26
FIGURA 8: Desgaste de flanco	27
FIGURA 9: Desgaste de cratera	28
FIGURA 10: Deformação plástica	28
FIGURA 11: Lascamento	29
FIGURA 12: Trincas térmicas nas guias	29
FIGURA 13: Quebra da ferramenta	30
FIGURA 14: Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura	30
FIGURA 15: Demonstração da quantificação dos principais desgastes nas brocas helicoidais	31
FIGURA 16: Característica microestrutural do ferro fundido cinzento	36
FIGURA 17: Broca SR.....	39
FIGURA 18: Broca Bor.....	39
FIGURA 19: Broca Bor_TiN	40
FIGURA 20: Broca TiN	41
FIGURA 21: Bloco de ensaio.....	41
FIGURA 22: Amostras do bloco embutida com resina com diâmetro 38mm	42
FIGURA 23: Estrutura do fofo cinzento	43
FIGURA 24: Esquematização das furações	46

FIGURA 25: Máquina ferramenta.....	47
FIGURA 26: Demonstração da câmera utilizada no registro de dados.....	48
FIGURA 27: Demonstração do posicionamento câmera-broca	49
FIGURA 28: Demonstração do <i>software Axion Vision</i>	49
FIGURA 29: Durômetro.....	50
FIGURA 30: Padrões de adesividade.....	51
FIGURA 31: Microdurômetro.....	52
FIGURA 32: Demonstração das camadas TiN.....	54
FIGURA 33: Demonstração das camadas boretadas.....	55
FIGURA 34: Demonstração das camadas boretadas+TiN	55
FIGURA 35: Resultado dos testes de adesividade nas brocas	56
FIGURA 36: Comparativo do desgaste de flanco da camada boretada e boretada+TiN.....	58
FIGURA 37: Comparativo do parâmetro de avanço	60
FIGURA 38: Demonstração do arrancamento de camada e formação de trincas	61
FIGURA 39: Demonstração do rompimento da aresta de corte.....	62
FIGURA 40: Demonstração do desgaste por abrasão e surgimento de trinca para boretada+TiN	63
FIGURA 41: Demonstração do fim de vida das brocas boretadas e boretadas+TiN.....	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Elementos químicos presentes em algumas séries do aço rápido.....	33
TABELA 2: Características dos principais revestimentos de ferramentas.....	34
TABELA 3: Características do processo de boretação	35
TABELA 4: Classificação dos ferros fundidos cinzentos	37

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Resultado de dureza	53
GRÁFICO 2: Demonstração de desgaste com V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot.....	57
GRÁFICO 3: Demonstração de desgaste com V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot.....	59
GRÁFICO 4: Demonstração de desgaste com V_c 35m/min e f_n 0,1mm/rot.....	61
GRÁFICO 5: Demonstração de desgaste com V_c 35m/min e f_n 0,2mm/rot.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - *American Iron and Steel Institute*

CVD - *Chemical Vapour Deposition*

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

f_n [mm/rot] avanço

HSS *High Speed Steel*

LR Limite de resistência

n [RPM] rotação

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

PVD *Physical Vapour Deposition*

V_c Velocidade de corte

V_f Velocidade de avanço

VBmed [mm] Desgaste de flanco médio

TiN Nitreto de Titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	OPERAÇÕES DE USINAGEM	19
2.2	FURAÇÃO	20
2.3	AS BROCAS COMO FERRAMENTAS DE FURAÇÃO	21
2.4	AS BROCAS HELICOIDAIS	22
2.4.1	Geometria da broca helicoidal.....	22
2.5	PARÂMETROS DE USINAGEM.....	24
2.6	CRITÉRIOS PARA FIM DE VIDA DA FERRAMENTA	25
2.7	DESGASTE E AVARIAS DAS BROCAS HELICOIDAIS	26
2.7.1	Desgaste de flanco.....	27
2.7.2	Desgaste de cratera.....	27
2.7.3	Deformação plástica	28
2.7.4	Lascamento	29
2.7.5	Trincas	29
2.7.6	Quebra	29
2.7.7	Quantificação do desgaste de brocas helicoidais	31
2.8	MATERIAIS PARA BROCAS.....	32
2.8.1	Aço rápido	32
2.9	REVESTIMENTOS	33
2.9.1	TiN	34
2.9.2	Boretação.....	35
2.10	FERROS FUNDIDOS.....	35

2.10.1	Ferro fundido cinzento	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	BROCAS	38
3.1.1	Os revestimentos.....	38
3.1.1.1	Brocas sem revestimento (SR).....	38
3.1.1.2	Brocas boretadas (Bor)	39
3.1.1.3	Brocas boretadas+Nitreto de Titânio (Bor_TiN).....	40
3.1.1.4	Brocas com Nitreto de Titânio (TiN)	40
3.2	BLOCO DE ENSAIO.....	41
3.2.1	Análise microestrutural do bloco de ensaio	42
3.3	PROCESSO DE FURAÇÃO	43
3.3.1	Parâmetros de corte.....	43
3.3.2	Meios lubrificantes	44
3.3.3	Metodologia de furação.....	44
3.4	ENSAIOS	47
3.4.1	Máquina ferramenta	47
3.4.2	Medição de desgaste	47
3.4.3	Dureza das brocas.....	50
3.4.1	Teste de adesividade	50
3.4.2	Caracterização de camada.....	51
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1	DUREZA DAS BROCAS	53
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS.....	54
4.2.1	Caracterização da camada das brocas revestidas de TiN.....	54
4.2.2	Caracterização da camada das brocas boretadas.....	54
4.2.3	Caracterização da camada das brocas boretadas+TiN.....	55

4.3	ADESIVIDADE	56
4.4	MEDIÇÃO DE DESGASTE.....	57
4.4.1	Condição 1 (parâmetro V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot).....	57
4.4.2	Condição 2 (parâmetro V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot).....	59
4.4.3	Condição 3 (parâmetro V_c 35m/min e f_n 0,1mm/rot).....	61
4.4.4	Condição 4 (parâmetro V_c 35m/min e f_n 0,2mm/rot).....	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A.....	69

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo que tem por objetivo dar formas a materiais em peças através da remoção de material (cavaco). Para isso, existem diversas maneiras de realizá-la. Essa remoção pode ser feita de forma manual ou através de máquinas e ferramentas utilizando os variados processos de usinagem existentes, tais como: torneamento, furação, fresamento, aplainamento, alargamento, mandrilhamento, brochamento, roscamento, retificação, tamboreamento, lapidação, entre outros (FERRARESI, 1970).

Dentre os processos de usinagem, o processo de furação vem ganhando destaque e corresponde a 30% dos demais processos utilizados. A larga escala de utilização evidencia que a maioria dos produtos feitos pela indústria em geral possui ao menos um furo (CASTILLO, 2005).

Para que os furos possam ser realizados, o processo utiliza ferramentas multicortantes chamadas brocas. Elas devem adentrar na peça usinada, fazer a remoção do cavaco e tornar a forma cilíndrica. Existem vários tipos de brocas das quais se destaca a broca helicoidal, responsável por 25% da utilização nesse processo. (CASTILLO, 2005; SOUZA; PRESTES; BASSANI, 2013).

O material dessas ferramentas é outro quesito substancial no processo e que influencia diretamente, devendo ser previamente definido. Os materiais disponíveis para as brocas são o aço rápido, metal duro, cerâmica, diamante, entre outros. As brocas de aço rápido "HSS" (*High Speed Steel*) são as mais utilizadas por diversas razões, dentre elas, as condições das máquinas operatrizes como potência, estado de conservação e principalmente parâmetros de corte (DINIZ et al, 2013).

Os parâmetros de corte como: velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) são os principais quesitos, pois boa parte das indústrias que possuem máquinas operatrizes não atingem altas velocidades de corte necessárias para utilizar outros tipos de brocas, como as de metal duro, por exemplo, que necessitam de altas rotações de trabalho (SOUZA; PRESTES; BASSANI, 2013).

Além disso, outra característica que vem sendo adotada para amenizar os impactos do atrito da broca com a peça a ser furada são os revestimentos superficiais nas ferramentas, pois no momento em que ocorre a remoção de cavaco, o atrito entre a broca e a peça usinada geram altas temperaturas que, conseqüentemente, afetam as arestas de corte da ferramenta

como: desgaste de flanco, desgaste de cratera, desgaste plástico, entre outros. Esse resultado diminui sua eficiência, sua afiação ou troca definitiva por outra broca (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2012).

Nesse sentido, testes e pesquisas relacionadas aos revestimentos superficiais têm sido realizados. Um dos revestimentos mais aplicados comercialmente nas ferramentas de corte é o TiN (Nitreto de Titânio), apresentando excelentes resultados nas propriedades e desempenho das ferramentas, sendo indicado para usinagem de diferentes materiais com a mesma ferramenta. Além disso, também possui uma boa relação custo x benefício (OLIVEIRA et al, 2010; SANTOS e SALES, 2007).

O desempenho das ferramentas de corte revestidas não é determinado só pela composição química do revestimento. A estrutura e a espessura da camada (monocamada, multicamada, espessura de cada subcamada, etc.) também possuem influência no desempenho e na vida da ferramenta (SANTOS e SALES, 2007).

Assim, há uma constante busca por novas alternativas de revestimentos para amenizar os desgastes das brocas. Por isso, os revestimentos de boro e boro+nitreto de titânio são novas alternativas para aplicação.

A adição de boro para revestimentos é feita através do tratamento termoquímico de boretação. A boretação consiste na difusão dos átomos de boro nas superfícies do material que se deseja revestir, neste caso, a superfície das brocas. As principais características do tratamento termoquímico de boretação é o endurecimento da camada e a resistência ao desgaste por abrasão.

1.1 Problema

De que maneira os revestimentos de boro e boro+nitreto de titânio podem influenciar na resistência ao desgaste de brocas helicoidais de aço rápido?

1.2 Justificativa

A maioria das empresas, oficinas, metalúrgicas entre outras, optam por brocas, com desempenho de baixo custo, porém o mercado já possui alguns tipos dessas ferramentas com diversas melhorias, tanto físicas ou químicas, que visam melhorar a competitividade, qualidade e reduzir quebras das brocas e desgaste dessas ferramentas.

Surgem cada vez mais novas opções e novas pesquisas para a melhoria da qualidade e vida útil dessas ferramentas de furação. Assim, este trabalho visa testar uma cobertura ainda não utilizada como revestimento de brocas.

O tratamento superficial através da boretação vem a ser uma nova opção para brocas. Ainda não testado e aplicado, o processo passará por testes de desgaste para avaliação de seu potencial de trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desgaste nas brocas de HSS com revestimento de boro e boro+TiN na furação a seco, através de ensaios nos laboratórios do IFSC-Jaraguá do Sul-Geraldo Werninghaus.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Caracterizar as camadas de boretos e boretos + TiN;
- Registrar a evolução do desgaste de flanco das brocas através de imagens;
- Avaliar a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte " V_c " e avanço " f_n ") no desgaste de flanco das brocas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

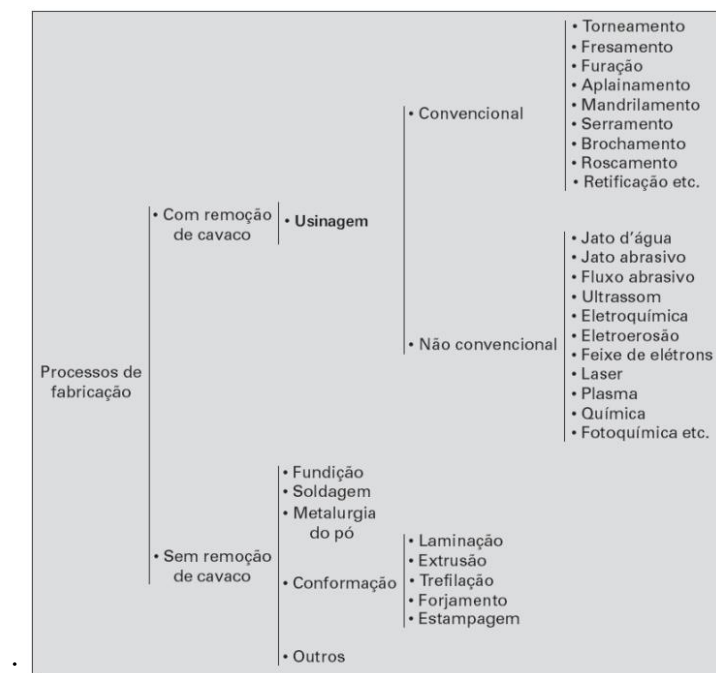
As definições encontradas a seguir estão apresentadas para que o leitor do presente trabalho possa ter um bom entendimento e aprofundamento de todos os assuntos que compõem os seus objetivos e resultados, assim, satisfazendo suas indagações e dúvidas através da complementação de dados.

2.1 OPERAÇÕES DE USINAGEM

De acordo com Ferraresi (1970, p 25) " como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três, produzem cavaco". O cavaco por sua vez, consiste no conjunto de material retirado durante o processo de usinagem e que possui características de formação com fenômenos distintos.

A usinagem é considerada uma operação complexa por ser muitas vezes imprevisível durante a operação, podendo ser dividida em diversos grupos e tipos, como pode ser observado na Figura 1. As operações de usinagem são realizadas em sua maioria utilizando ferramentas de corte, o que torna suas operações as únicas que sofrem deformação plástica (MACHADO et al, 2012).

FIGURA 1: Processos de fabricação



Fonte: Machado et al (2012, p.18)

Souza (2011) ainda cita que a usinagem tem a fama de ser um processo essencialmente prático e ao mesmo tempo responsável por um elevado número de variáveis. Ele também afirma que é impossível prever o desempenho das ferramentas que envolvem os diversos processos na área. Por esse simples motivo, os estudos detalhados neste ramo estão cada vez mais constantes.

2.2 FURAÇÃO

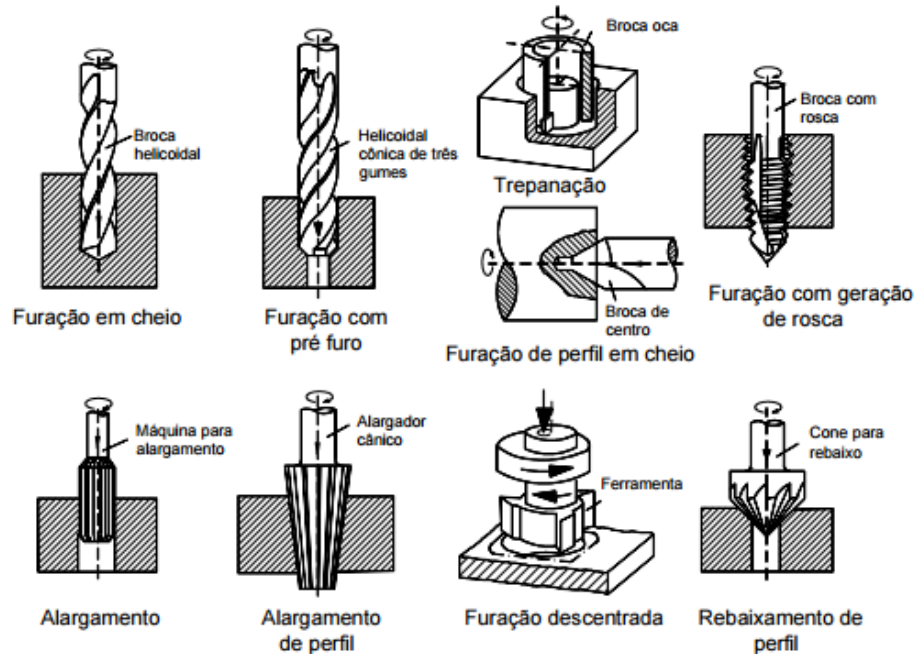
A furação é considerada um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria da manufatura, sendo empregada em 30% das usinagens em metal. As peças tendem a ser furadas em cheio ou terem os furos trabalhados, ou seja, aumentados no processo de furação (KIECKOW; PRESTES; BASSANI, 2013).

De acordo com Ferraresi (1970, p. 29) “Furação é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com o auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante”.

As operações de furação, como todo processo de usinagem, possuem condições de trabalho imprevisíveis, podendo resultar em problemas como excentricidade dos furos gerados, principalmente quando é a ferramenta que está rotacionando. Por esse motivo a usinagem por furação, juntamente como o fresamento e o torneamento, garantem desenvolvimento tecnológico para tornar o processo cada vez mais eficiente (STEMMER, 2007).

A furação em cheio é o carro-chefe no processo de furação, existindo outros quatro: escareamento, furação de centros, trepanação e furação descentrada, como pode ser observado na Figura 2. A furação em cheio executa furos cilíndricos, resultando na retirada de todo material contido no furo (MARMENTINI, 2009).

FIGURA 2: Tipos de furação

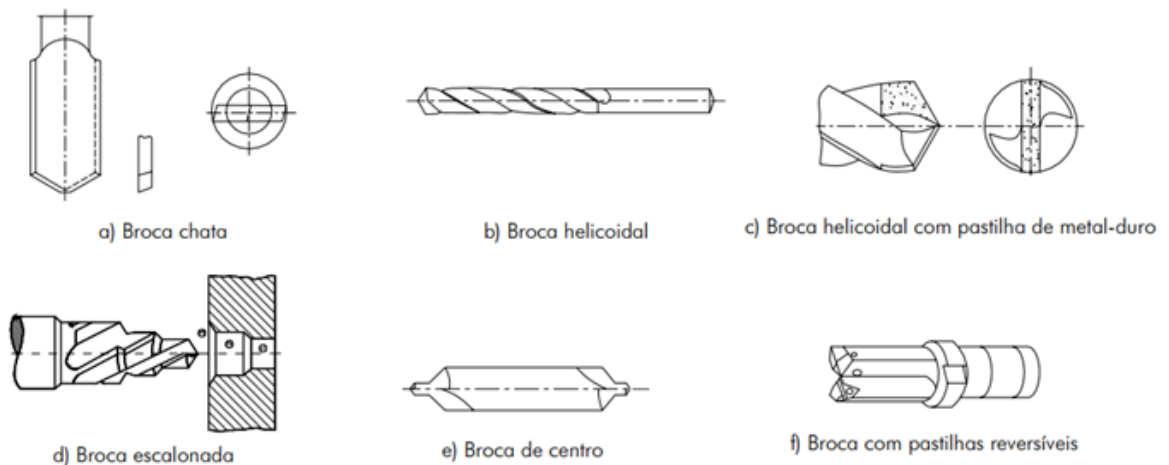


Fonte: König e Klocke (1997, *apud*, Castillo, 2005 p.22)

2.3 AS BROCAS COMO FERRAMENTAS DE FURAÇÃO

A broca é a ferramenta utilizada para a realização deste tipo de usinagem. Tais ferramentas possuem diversos tipos e formas que variam de acordo com a necessidade da operação a ser realizada (STEMMER, 2007):

FIGURA 3: Tipos de brocas



Fonte: Stemmer (2001, *apud*, Castillo, 2005 p.23)

- Brocas chatas: esse tipo de broca possui uma operação bastante limitada, não suporta momento de torção muito altas e a evacuação do cavaco não é boa quando em furacões

mais profundas. Por isso as brocas chatas são utilizadas para furação em madeira e materiais frágeis, como latão e bronze. Esse tipo de broca é o mais antigo dentre todos os outros tipos.

- Brocas canhão: as brocas canhão são utilizadas com o auxílio de pastilhas, pois são usadas principalmente para a furação mais profunda. Uma das vantagens do uso dessa ferramenta é que o fluido refrigerante passa através da sua haste oca e a remoção do cavaco é feita no próprio canal da ferramenta garantindo melhor expulsão do cavaco.
- Brocas de centro: utilizadas para fazer a marcação no centro de furos que serão executados posteriormente.
- Brocas escalonadas: este tipo de broca é utilizado para operação em grande escala, pois pode executar furos com mais de um diâmetro, e operações de alargamento e chanframento.
- Brocas com pastilhas reversíveis: a produtividade deste tipo de broca é uma das suas principais vantagens, porém só pode ser utilizada quando se desejam furos maiores que Ø12 milímetros.
- Brocas helicoidais: alvo principal deste trabalho, a broca helicoidal é a mais utilizada na furação. Podendo ser de diversos materiais e com pastilhas intercambiáveis, as brocas helicoidais são utilizadas para furos de pequena e média profundidade.

2.4 AS BROCAS HELICOIDAIS

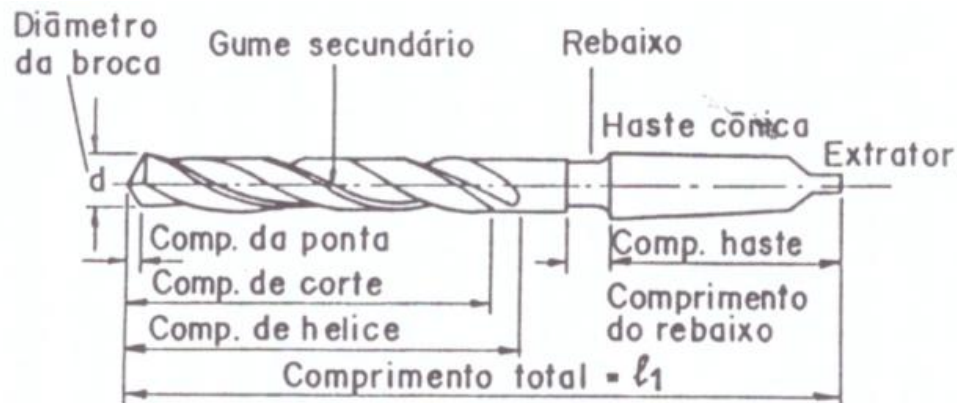
Sendo a ferramenta mais utilizada quando se deseja executar um furo, a broca de forma helicoidal é fabricada em diversos materiais, principalmente em aço rápido e metal duro, podendo ter o acréscimo de revestimentos de superfícies que garantem maior usinabilidade e rapidez na operação (DINIZ et al. 2013).

2.4.1 Geometria da broca helicoidal

A broca helicoidal possui geralmente dois tipos de haste: a cilíndrica e a cônica (Figura 6). O que diferencia uma da outra são os esforços que a ferramenta sofrerá durante a operação, ou seja, a broca com haste cônica suporta mais esforços do que a de haste cilíndrica (SENAI-SP, 2009).

De acordo com Diniz, Marcondes e Copini (2013), as brocas possuem como estrutura principal a haste, o corpo, ponta, guias, canais helicoidais e aresta cortante, como pode ser observado na Figura 4.

FIGURA 4: Descrição dos componentes estruturais das brocas helicoidais com haste cônica

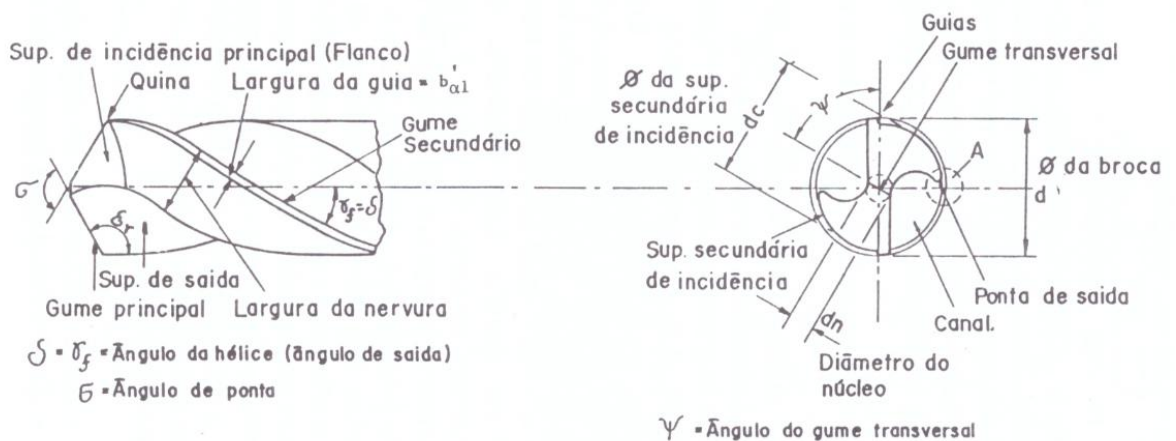


Fonte: Stemmer (2005, p 4)

A haste é responsável pela fixação da ferramenta na máquina, que pode ser feita com mandris, quando possui tamanho menor e com cone morsa quando a broca possui diâmetro maior. O corpo é o comprimento real da ferramenta, sendo responsável por guiar toda a operação de furação, principalmente em guiar o cavaco gerado para o exterior. A ponta é responsável por "abrir passagem" e é ela que recebe a afiação que por sua vez forma o ângulo de ponta, variando o tipo para cada material a ser usinado. Os canais helicoidais servem para facilitar a expulsão do cavaco e a entrada do fluido refrigerante, juntamente com as guias que, como o próprio nome sugere, guia a broca durante o furo (DINIZ et al. 2013; SENAI-SP, 2009).

Na Figura 5 é possível observar com mais detalhes a ponta da ferramenta e seus gumes que ficam virados para o sentido de avanço da máquina.

FIGURA 5: Descrição dos aspectos da ponta de uma broca helicoidal



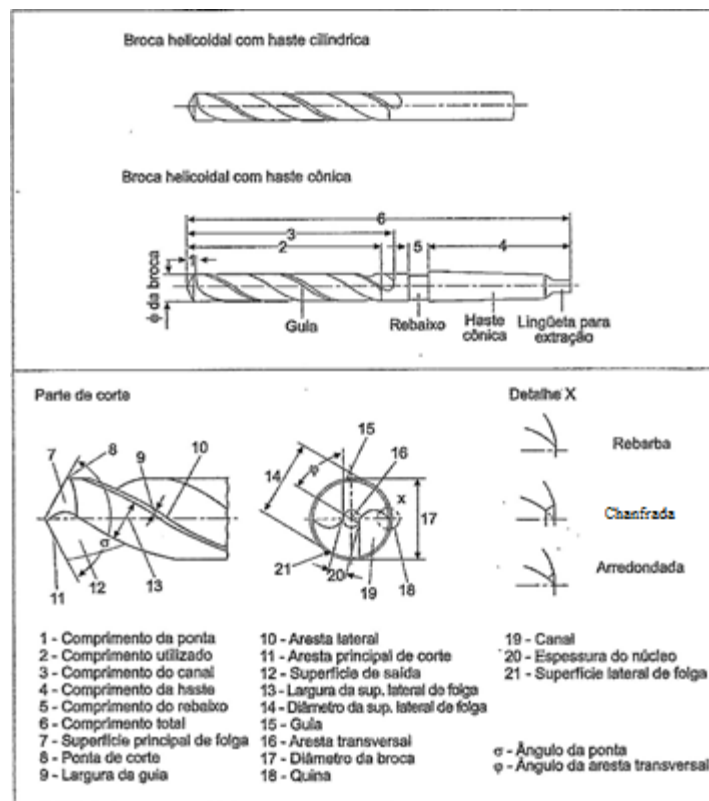
Fonte: Stemmer (2005 p.4)

O **ângulo de ponta** (σ) é o ângulo formado entre as duas arestas de corte e geralmente possui 118° . O tamanho do ângulo de ponta influencia também no tamanho do cavaco gerado, pois ângulos maiores formam cavacos maiores e pouco largos. Com o uso de um ângulo menor, o momento torçor aumenta (DINIZ et al., 2013, grifo nosso).

O **ângulo de incidência** (α) tem a função de facilitar a entrada da broca no material, reduzindo o atrito entre a broca e o material, com um ângulo que varia de 6 a 27° . Os ângulos menores são utilizados mais materiais mais duros e os ângulo maiores para materiais menos duros. O **ângulo de saída** (γ) auxilia em três funções fundamentais: controle do acabamento, profundidade do furo e desprendimento do cavaco (SENAI-SP, 2009, grifo nosso).

As outras partes que formam as brocas helicoidais e que são de grande importância destacar podem ser observadas na Figura 6.

FIGURA 6: Partes complementares das brocas helicoidais



Fonte: Diniz et al. (2013, p.199)

2.5 PARÂMETROS DE USINAGEM

Para que o processo de usinagem seja satisfatório é de grande importância controlar as forças que atuam durante os processos de usinagem de uma maneira geral. Geralmente

atuando na cunha das ferramentas, as forças de corte influenciam em todo o processo (SANTOS E SALES, 2007).

Para o controle das forças de corte são utilizados parâmetros que, quando devidamente definidos influenciam diretamente na qualidade, custo, tempo e todos os demais aspectos envolvidos. Os principais parâmetros segundo Marques (2012), Ferraresi (1970) e Machado et al. (2012) são:

- **Avanço (f):** como o próprio nome já diz, avanço é quanto a ferramenta se desloca durante o processo;
- **Profundidade de corte (a_p):** é equivalente ao raio do diâmetro da ferramenta de corte, quando se tratar de processo de furação (STEMMER,2005);
- **Velocidade de avanço (V_f):** De acordo com Machado et al. (2012, p.31) “ velocidade de avanço é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte”. Ela é calculada de acordo com a equação 1:

$$V_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (1)$$

Onde: f = avanço (mm/rot)

n= rotações por minuto (rpm)

- **Velocidade de corte (V_c):** de acordo com Stemmer (1993, p.10) "é a velocidade instantânea do movimento principal, do ponto selecionado do gume em relação a peça". Para determinar esta velocidade é utilizada a Fórmula 1.

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

Onde: d = diâmetro da broca (mm)

n= rotações por minuto (rpm)

2.6 CRITÉRIOS PARA FIM DE VIDA DA FERRAMENTA

De acordo com Ferraresi (1970, p. 424) “denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder a sua capacidade de corte, dentre de um critério previamente estabelecido”.

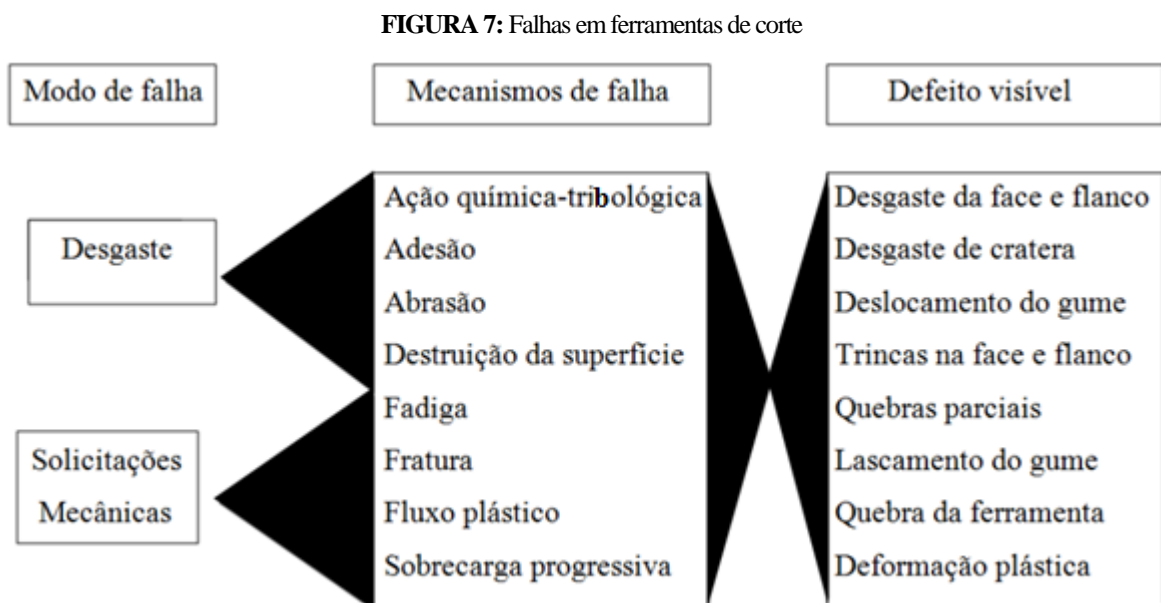
Definido pelo grau de desgaste, o fim de vida depende de vários fatores como descrevem Santos e Sales (2007, p. 160):

- Receio de quebra da cunha cortante;
- Elevadas temperaturas nas interface cavaco-ferramenta;
- As tolerâncias dimensionais estabelecidas no projeto já estão comprometidas;
- O acabamento da superfície usinada não é mais satisfatório;
- Aumento nas dimensões da rebarbas;
- Elevação da força de usinagem;
- Nível de ruído maior;
- Crescente nível de vibrações;
- Outros.

Os critérios de fim de vida podem ser definidos de diversas maneiras como: trajetória de avanço, número de peças produzidas, distância percorrida pelo efetivo de corte, volume de cavaco, entre outros (SANTOS e SALES, 2007).

2.7 DESGASTE E AVARIAS DAS BROCAS HELICOIDAIS

De acordo com Diniz et al. (2013, p. 107) "desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte". As demais ocorrências são denominadas de avarias. Os desgastes comuns associados a essas ferramentas de acordo com o autor são:

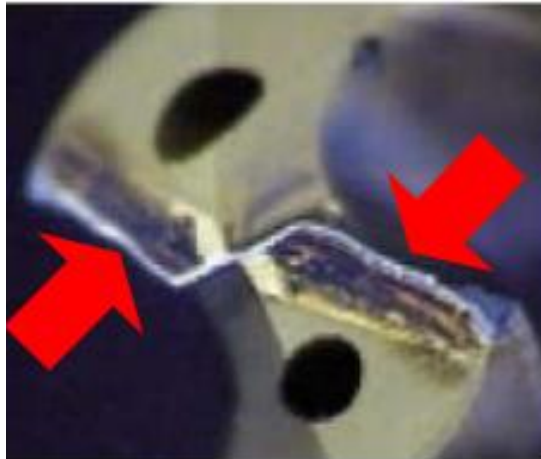


Fonte: Bunshah (2001, *apud*, Marques 2012, p.18)

2.7.1 Desgaste de flanco

O desgaste de flanco, também conhecido como desgaste frontal, acontece na superfície principal de folga da broca e é ocasionado pelo contato da ferramenta com a peça (Figura 8).

FIGURA 8: Desgaste de flanco



Fonte: Sandiwik Coromand (2006, *apud* Fortunato, 2012, p25)

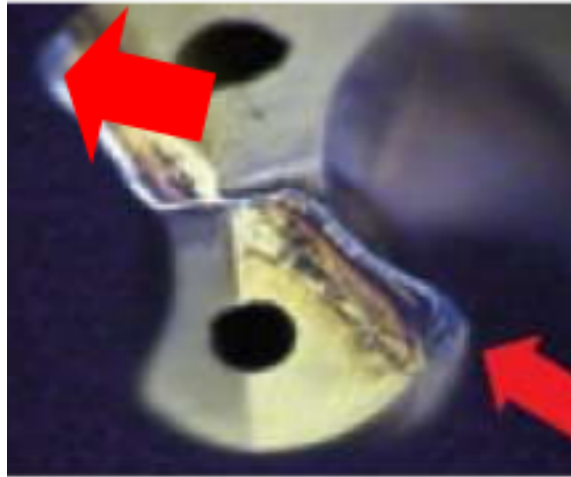
O desgaste de flanco é o principal agente causador do fim de vida da ferramenta, sendo causado em quase todo processo de usinagem por furação (SANTOS e SALES, 2007).

Ainda Santos e Sales (2007) diz que com a perda de ângulo de folga gerado pelo desgaste do flanco, reflete num aumento da superfície de contato da ferramenta com material, gerando naquela região mais atrito.

2.7.2 Desgaste de cratera

Este desgaste pode levar ao descarte total da ferramenta pois é ocasionada pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco e ocorre na superfície de saída da broca (Figura 9).

Santo e Sales (2007, p.161) diz, " este tipo de desgaste geralmente está associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta". Ainda Santos e Sales (2007) diz que o desgaste cratera ocorre da combinação de desgaste por adesão e difusão, com saída do cavaco em contato com a superfície de saída da ferramenta.

FIGURA 9: Desgaste de cratera

Fonte: Sandiwik Coromand (2006, *apud* Fortunato, 2012, p26)

2.7.3 Deformação plástica

A pressão acumulada na ponta da ferramenta, juntamente com temperaturas elevadas durante a usinagem são os principais causadores desse tipo de deformação que ocorre na aresta de corte da broca, deixando-a com uma deformação específica. A deformação plástica pode ocasionar a quebra da aresta de corte da ferramenta (Figura 10).

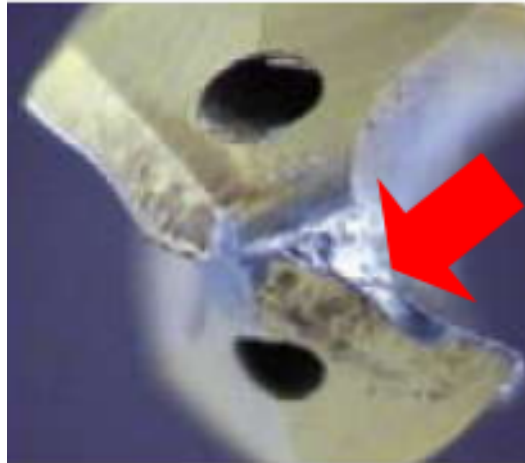
FIGURA 10: Deformação plástica

Fonte: Sandiwik Coromand(2006, *apud* Fortunato, 2012, p26)

2.7.4 Lascamento

O lascamento se enquadra no grupo das avarias. Nesta avaria ocorre o desprendimento de particulados da broca, podendo afetar a qualidade dos furos e também fratura da ferramenta (Figura 11).

FIGURA 11: Lascamento

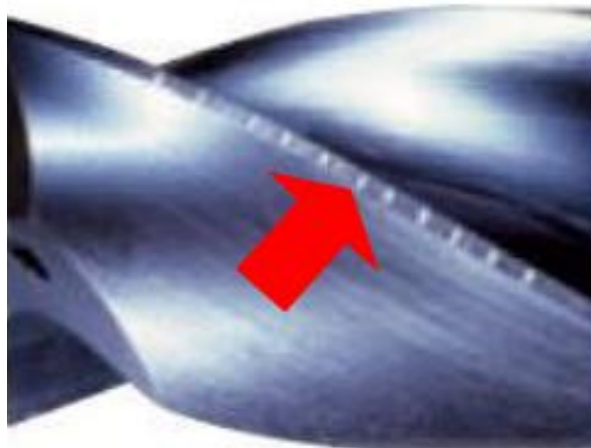


Fonte: Sandiwik Coromand (2006, *apud* Fortunato, 2012, p26)

2.7.5 Trincas

Conforme explica Diniz et al (2013 pág. 109) em sua literatura, as trincas " [...] são avarias provocadas pela variação da temperatura e/ou dos esforços mecânicos(Figura 12).

FIGURA 12: Trincas térmicas nas guias



Fonte: Sandiwik Coromand (2006, *apud* Fortunato, 2012, p27)

2.7.6 Quebra

Quando há um acumulado de problemas gerados pelo desgaste e avarias a broca pode passar pelo fenômeno de quebra, conforme a figura 13. Porém, em alguns casos a quebra

pode ocorrer devido a material da ferramenta ser muito duro (frágil) , ou devido à carga exagerada aplicada na ferramenta (DINIZ et al., 2013).

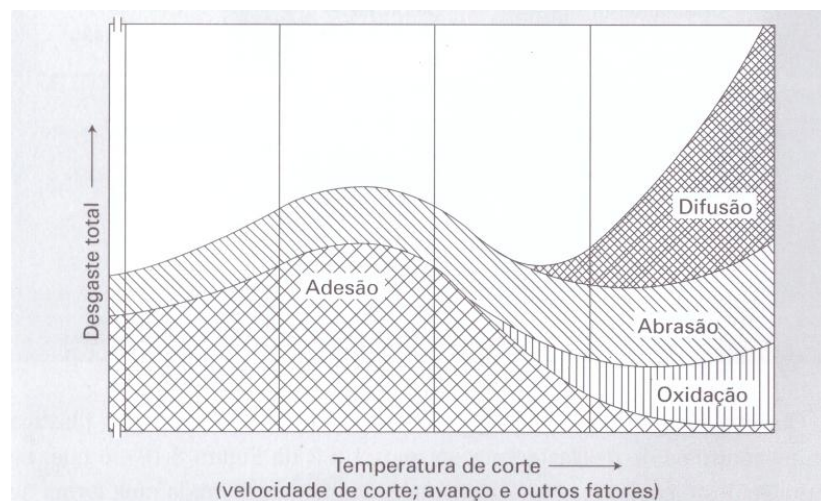
FIGURA 13: Quebra da ferramenta



Fonte: Sandiwik Coromand (2006, *apud* Fortunato, 2012, p27)

Existem quatro mecanismos responsáveis por causar os desgastes e avarias nas ferramentas de corte são eles: abrasão, adesão, difusão e oxidação (Machado et al., 2012), conforme demonstra a Figura 14.

FIGURA 14: Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura



Fonte: Machado et al (2012, p.271)

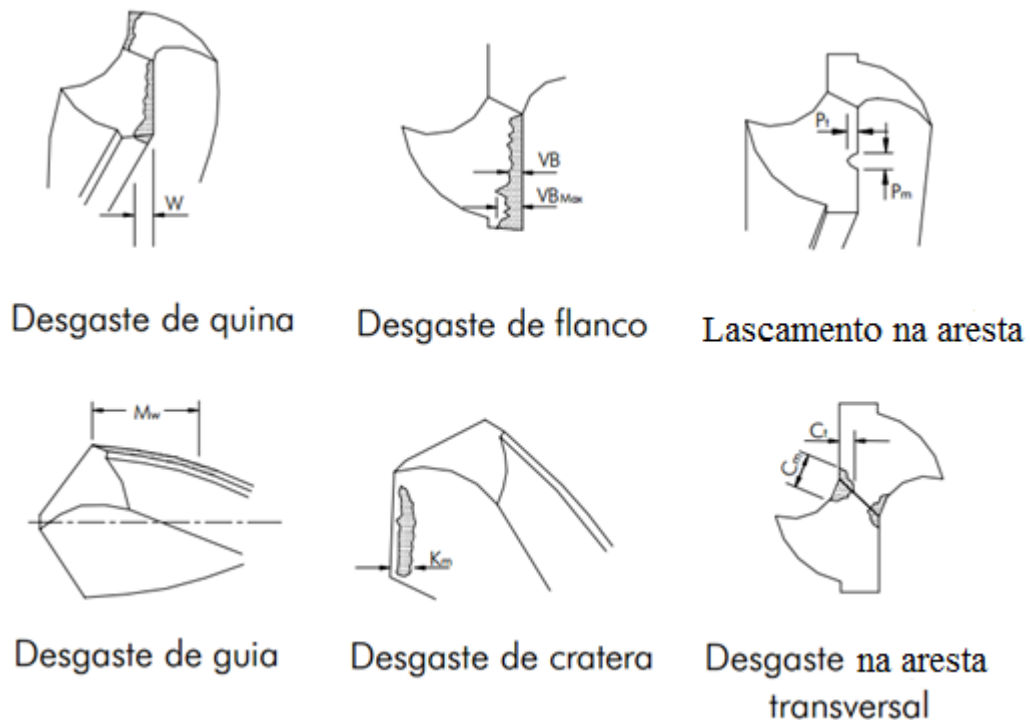
Diniz et al. (2013,p.115) diz, "a **difusão** entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte . A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro." A **adesão** Machado et al (2012, p.278) diz que "ocorre, geralmente, as baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular", estes resultados de cortes irregulares ocasionam o surgimento de fragmentos microscópicos, que são arrancado da superfície da ferramenta e são arrastados junto com o fluxo do material. Já o mecanismo de **abrasão** é o responsável por causar o desgaste frontal (flanco) e o desgaste de cratera e promovido através de partículas duras contidas no material ou até mesmo da ferramenta ocasionado pelo atrito. A **oxidação** é ocasionada por um conjunto de fatores, ou seja, as altas temperaturas durante a usinagem associadas com o fluido de corte e o ar causam reações químicas que formam a

oxidação (DINIZ et al., 2013; FERRARESI, 1970; SOUZA, 2011; MACHADO et al, 2012, grifo nosso).

2.7.7 Quantificação do desgaste de brocas helicoidais

Grande parte dos desgastes e avarias podem ser medidas, desta maneira são estabelecidos locais para a medição como pode ser observado na Figura 15

FIGURA 15: Demonstração da quantificação dos principais desgastes nas brocas helicoidais



Fonte: Kanai et al., 1978 (*apud*, Castillo, 2005 p.41)

Um dos mais usuais é desgaste de flanco, que no caso é identificado pela sigla VB, que é utilizada quando há a necessidade de quantificar o desgaste. A norma ISO 3685(1993) recomenda os seguintes critérios para a avaliação do desgaste de flanco dos aços rápidos, metais duro e cerâmica (SANTOS e SALES, 2007):

- Desgaste de flanco médio ($VB_{méd}$) = 0,3 mm;
- Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) = 0,6 mm;
- Profundidade de cratera, (K_t) = $0,06+0,3 f$, onde f é o avanço em mm/ rot;
- Falha catastrófica.

2.8 MATERIAIS PARA BROCAS

Os materiais para ferramentas mais utilizados são o aço rápido e o metal duro, na sequência os aços rápidos com cobertura, o metal duro com cobertura, os materiais cerâmicos, diamante, nitreto de boro cúbico e as ligas fundidas. A escolha do material depende diretamente de diversos aspectos, como apresentam Ferraresi (1970) e Diniz et al. (2013):

- **Material a ser usinado:** a broca escolhida deve ser adequada as propriedades mecânicas do material a ser usinado; devem ser observados principalmente a dureza e o tipo de cavaco formado;
- **Processo de usinagem:** existem materiais que exigem um processo de usinagem mais rápido, ou seja, com uma rotação de ferramenta maior por exemplo, tendo em vista que cada material de ferramenta possui um limite de operação;
- **Condição da máquina operatriz:** o estado em que a máquina se encontra como sua potência, estado de conservação, ou seus limites velocidades, são mais um ponto relevante na escolha do material da ferramenta;
- **Custo do material da ferramenta:** muitas vezes para determinados produtos a serem usinados, o custo alto de ferramentas pode não ser compensatório, apesar de poder gerar vida útil e produção maior. Por isso o custo da ferramenta é levado em consideração em quase todos os sistemas de produção;
- **Condições de usinagem:** todas as condições de usinagem como desbaste e acabamento possuem condições como altas velocidades de corte, no caso do acabamento, e baixa velocidade de corte quando há desbaste; dessa forma, para cada condição deve haver uma ferramenta específica.

Dessa forma, para superar todas as condições de usinagem, a ferramenta precisa de vários aspectos tais como: resistência ao desgaste, dureza a quente, tenacidade e estabilidade química (DINIZ et al., 2013).

2.8.1 Aço rápido

O aço rápido (ou HSS) é um aço que apresenta alta dureza a quente, o que possibilita o aumento das velocidades de corte, por isso o nome aço rápido. O aumento da dureza quando há altas temperaturas, se dá devido à transformação da austenita encrustada na

martensita e da precipitação dos carbonetos. Isso leva a uma margem de manutenção da dureza em temperaturas de até 600°C (SANTOS E SALES, 2007).

Ainda de acordo com Santos e Sales (2007) os aços rápidos possuem duas classificações que são chamadas de séries. A série M, é composta por 19% de molibdênio em média, juntamente com outros elementos de liga como cromo, tungstênio, vanádio e cobalto, já a série T é composta por 12 a 18% de tungstênio e demais elementos de liga. Dentre as duas séries, a M é a que possui maiores resistências abrasivas e é a que sofre menos deformações quando submetida a tratamentos térmicos.

Na tabela 1 é possível observar algumas composições de alguns elementos das duas séries.

TABELA 1: Elementos químicos presentes em algumas séries do aço rápido

SÉRIE	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo
T1	0,7%	0,1%	0,1%	4,0%	1,0%	18,0%	0,7%
T4	0,7%	0,1%	0,1%	4,0%	1,0%	18,0%	0,6%
T6	0,75%	0,1%	0,1%	4,0%	1,6%	18,75%	0,65%
M2	0,8%	0,1%	0,1%	4,0%	1,7%	6,0%	4,75%
M15	1,5%	0,1%	0,1%	4,0%	4,75%	6,25%	3,0%
M30	0,8%	0,1%	0,1%	3,75%	1,10%	1,5%	8,25%

Fonte: adaptado de Machado et al. (2012)

2.9 REVESTIMENTOS

O uso de revestimentos em ferramentas, de um modo geral, é utilizado para aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta e proporcionar seu bom desenvolvimento, garantindo a qualidade da peça (SANTOS e SALES, 2007).

Os revestimentos são produzidos por dois processos de deposição: o processo CVD (deposição química de vapor), feito por deposição química entre temperaturas de 900 a 1100°C e o processo PVD (deposição física de vapor), feito por deposição física, cuja temperatura gira em torno dos 500°C (SANTOS e SALES, 2007).

Para o revestimento do aço rápido é utilizado o processo PVD, no qual a ferramenta é colocada em um ambiente de vácuo e os gases do material são vaporizados sobre a ferramenta (DINIZ et al., 2013).

De acordo com Santos e Sales (2007), os revestimentos PVD são:

- TiN;
- TiAlN;
- TiCN;
- WC/C;
- CrN;
- MoS;
- DLC (Diamond like carbon).

As características desses revestimentos podem ser observadas com mais detalhes na tabela 2.

TABELA 2: Características dos principais revestimentos de ferramentas

Revestimento	TiN	TiAlN	TiCN	Multicamadas	DLC	MoS ₂
Processo de deposição	PVD	PVD	PVD	PVD	CVD	PVD
Temperatura de deposição (°C)	450-500	350-(270*)	450-500	450-500	1000	100-150
Substrato	Aço –rápido e metal duro	Aço –rápido e metal duro	Aço –rápido e metal duro	Aço –rápido e metal duro	Metal duro com <6% Co	Aço –rápido e metal duro cermet
Estrutura	Mono	Mono	Multi	Multi	Mono	Mono
Número de camadas	1	1 (2**)	Mínimo 7	Mínimo 42	1	1
Cor	Dourado	Preto-violeta	Cinza-violeta	Violeta-vermelho	cinza	Verde oliva escuro
Espessura (µm)	1,5 – 3	1,5 – 3	4 – 8	1 – 5	3 - 10	0,2 – 0,5
Dureza (HV _{0,05})	2200	3300	3000	3500	10.000	20 – 50
Coefficiente de atrito contra o aço	0,4	0,3	0,25	0,3	-	0,05 – 0,15
Condutividade térmica (kW/mK)	0,07	0,05	0,1	0,05	2	<0,1
Máxima temperatura de trabalho (°C)	600	800	450	800	600	800
Remoção do revestimento	Somente aço-rápido	Aço-rápido e metal duro	Não ***	Aço-rápido e metal duro	Não	Sim
Novo revestimento	Sim	Sim	Somente TiN	Sim	Não	Sim
Aplicação de novo revestimento sem remoção do antigo	5X	5X	2X	5X	—	5X
Ideal para a usinagem dos materiais	Universal	Ferro fundido e Al-Si	Aço	Universal	Grafite Al-Si	A, Al-Si e aço
Processo de usinagem	Universal	Torneamento e furação	Fresamento, furação e rosqueamento	Universal	Torneamento e furação	Furação, rosqueamento, alargamento e fresamento
Especialidades	Custo/benefício	Usinagem a seco	Resistência ao impacto	Custo/benefício resistência ao impacto e corte a seco		Prevenção da aresta postiça de corte e resistência à água e óleo

Sant Fonte: Santos e Sales (2007, p.132)

2.9.1 TiN

O TiN possui um ótimo desenvolvimento e é indicado para usinagens a seco e quando peças de diversos materiais precisam ser usinadas com a mesma ferramenta (SANTOS e SALES, 2007).

Revestimentos de TiN também possuem excelente resistência à corrosão e à erosão, alta temperatura de sublimação, dureza elevada e boas propriedades ópticas e eletrônicas (GONÇALVES, 2010).

2.9.2 Boretação

A boretação é um tratamento termoquímico que, assim como os demais revestimentos, tem o objetivo de aumentar a dureza superficial. Na boretação, o boro (B) é difundido na ferramenta sob temperaturas de 1000°C (ASM INTERNACIONAL, 1991).

O tratamento pode ser feito em meio líquido, sólido ou gasoso, porém o meio sólido é o mais utilizado e é feito através de pó boretante, que é aquecido e submetido durante determinado tempo em cadinhos colocados em fornos específicos para o tratamento (ASM INTERNACIONAL, 1991).

Durante o tratamento de boretação podem ser formadas três fases: Fe₂B, FeB e Fe₂B + FeB. Na tabela 3 a seguir é possível observar as características provenientes deste processo (SINHA, 1991).

TABELA 3: Características do processo de boretação

CARACTERÍSTICA	FeB	Fe ₂ B
Teor de boro (% em massa)	16,23	>8,83
Densidade (g/cm ³)	6,75	7,43
Coefficiente de expansão térmica, entre 200 e 600°C (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	23	7,65
Módulo de elasticidade (GPa)	590	285-295
Microdureza (GPa)	19-21	18-20

Fonte: adaptado de SINHA, (1991)

Atualmente, a boretação é utilizada no ramo automotivo, em válvulas, discos, engrenagens, bombas e diversos outros elementos. O aumento das aplicações desse tratamento se dá devido durezas elevadas, que garantem ao material tratado uma resistência ao desgaste, principalmente abrasivo (PETROVA et al., 2007).

2.10 FERROS FUNDIDOS

De acordo com Askeland e Phulé (2008) “os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono-silício que contêm basicamente 2-4% C e 0,5-3% Si, que passam pela reação eutética durante a solidificação”.

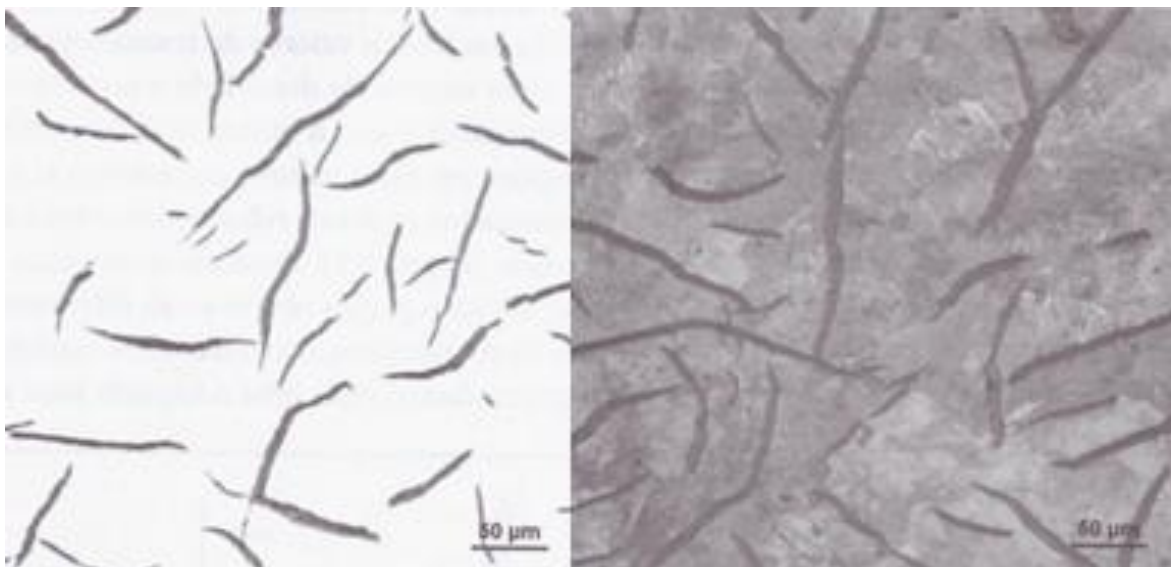
Os ferros fundidos são divididos em diversas famílias, tais como: ferro fundido nodular, vermicular, cinzento, branco e maleável. Suas principais características de acordo com Guessser (2009) são:

- Ferros fundidos nodulares: com um limite de resistência de 380-450 Mpa, o ferro fundido nodular possui um aspecto parecido com nódulos. Sua principal característica é a ductilidade;
- Ferros fundidos maleáveis: seus limites de resistência ficam entre 300 e 700 Mpa e são obtidos através de tratamentos térmicos;
- Ferros fundidos brancos: suas principais características são a alta dureza e resistência ao desgaste por abrasão. Sendo duro e frágil, seu aspecto esbranquiçado é o motivo do nome;
- Ferros fundidos vermiculares: sua formação é muito parecida com a forma de vermes. Esta família é utilizada na fabricação de blocos de motores a diesel e coletores de exaustão.

2.10.1 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é o mais utilizado, sendo empregado para fabricação de blocos e cabeçotes de motores, carcaças e discos de freios, ou seja, é utilizado principalmente por sua boa condutividade térmica. Sua aparência possui um aspecto venoso como pode ser observado na figura 15 (GUESSER, 2009).

FIGURA 16: Característica microestrutural do ferro fundido cinzento



Fonte: Guessser (2009, p.4).

Os ferros fundidos cinzentos são classificados de acordo com a norma ABNT, conforme tabela 4. A classificação é feita de acordo com a resistência a tração dada em LR (ASKELAND e PHULÉ, 2008).

TABELA 4: Classificação dos ferros fundidos cinzentos

Classe	D (mm) (*)	d (mm) (**)	LR mínimo (MPa)
FC-100	20	20,0	100
FC-150	13	8,0	230
	20	12,5	180
	30	20,0	150
	45	32,0	110
FC-200	13	8,0	280
	20	12,5	230
	30	20,0	200
	45	32,0	160
FC-250	13	8,0	330
	20	12,5	280
	30	20,0	250
	45	32,0	210
FC-300	20	12,5	330
	30	20,0	300
	45	32,0	260
FC-350	20	12,5	380
	30	20,0	350
	45	32,0	310
FC-400	30	20,0	400
	45	32,0	360

D – diâmetro da barra no estado bruto de fundição / d – diâmetro do cp usinado

Fonte: Guessser (2009, p.46).

Os ferros fundidos cinzentos são muito utilizados em usinagens a seco, pois sua porcentagem de grafita (10%) acaba agindo como lubrificante e facilitando a quebra do cavaco, assim como também faz o sulfeto de manganês (2%), que age como lubrificante entre a zona de contato ferramenta/cavaco (GUESSER, 2009).

Porém, por outro lado, quanto maior a resistência à tração do ferro fundido cinzento, ou seja, quanto maior a classe, pior será a usabilidade do material. Isso se deve pelo aumento da perlita, que aumenta a abrasão e pela diminuição de grafita (GUESSER, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais que foram detalhados a seguir e tem como objetivo demonstrar os passos da realização deste trabalho, a demonstração dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados, assim como a estratégia para sua realização. Os experimentos foram realizados nos laboratórios do IFSC Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus no período de novembro de 2015 a março de 2016.

3.1 BROCAS

A definição do tipo de broca e seu material foi o primeiro passo para o início dos ensaios. Foram utilizadas quarenta e oito brocas da marca TDC do tipo helicoidal de aço rápido, com doze milímetros de diâmetro e comprimento de cento de cinquenta e um milímetros, com haste paralela DIN338 e ponta de 118°.

3.1.1 Os revestimentos

Os revestimentos das ferramentas foram definidos e agrupados conforme a tabela 5. Cada grupo de revestimento possui a quantidade de doze brocas, quantidade escolhida para uma maior confiabilidade nos resultados.

TABELA 5: Classificação e grupos de revestimentos das brocas

Grupo	Tipo	Abreviação	Quantidade	Camada
1	Sem Revestimento	(SR)	12 brocas	Sem camada
2	Boretada	(Bor)	12 brocas	Monocamada
3	Boretada + TiN	(Bor_TiN)	12brocas	Multicamada
4	TiN	(TiN)	12 brocas	Monocamada

Fonte: o autor (2016)

3.1.1.1 Brocas sem revestimento (SR)

O primeiro grupo com brocas sem revestimento, foi escolhida para servir como base de referência para avaliar o desempenho em relação aos outros tipos de brocas com alterações superficiais (Figura 17).

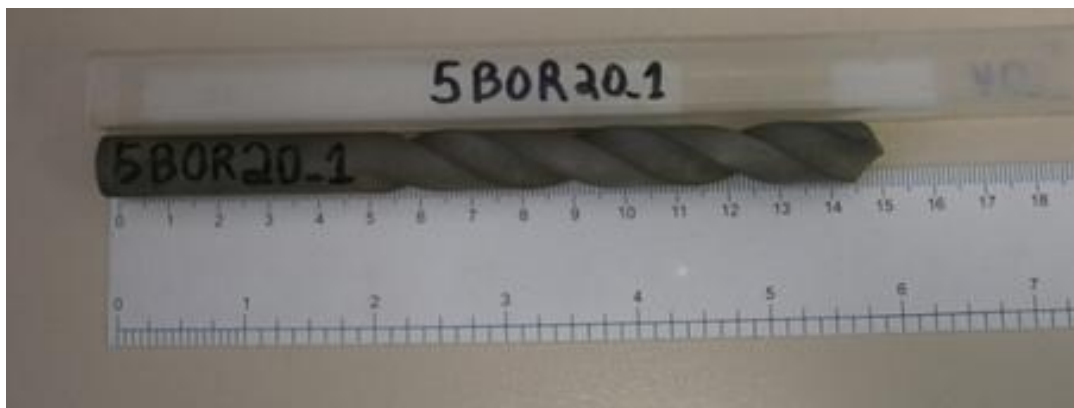
FIGURA 17: Broca SR

Fonte: o autor (2016)

3.1.1.2 Brocas boretadas (Bor)

As brocas boretadas monocamada foram obtidas a partir do processo de boretção sólida que foi realizado em parceria com a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). O processo foi iniciado com a limpeza das doze brocas. Em seguida, cada uma delas foi posta com a ponta para baixo em um cadinho com diâmetro de 2 polegadas, preenchido com o pó boretante da marca Ekabor® sua composição contém 5% B_4C , 5% KBF_4 , 90% SiC , logo após, o cadinho com a preparação foi colocado no forno tipo mufla para o início da boretção. No forno foram postos três cadinhos contendo, cada um deles, uma broca como descrito.

O processo de boretção ocorreu com taxa de aquecimento de $10^\circ C/min$, até a temperatura de $1000^\circ C$, permanecendo ainda sob essa temperatura durante duas horas, a taxa $10^\circ C/min$ foi escolhida para evitar choque térmico e possíveis empenamentos na ferramenta. O resfriamento foi ao ar, a broca boretada encontra-se na Figura18.

FIGURA 18: Broca Bor

Fonte: o autor (2016)

3.1.1.3 Brocas boretadas+Nitreto de Titânio (Bor_TiN)

O grupo das brocas boretadas+TiN, passou primeiramente pelo processo de boretção sólida que foi realizado em parceria com a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). O processo foi iniciado com a limpeza das doze brocas. Em seguida, cada uma delas foi posta com a ponta para baixo em um cadinho com diâmetro de 2 polegadas, preenchido com o pó boretante da marca Ekabor® e, logo após, o cadinho com a preparação foi colocado no forno tipo mufla para o início da boretção. No forno foram postos três cadinhos contendo, cada um deles, uma broca como descrito.

O processo de boretção ocorreu com taxa de aquecimento de 10°C/min, até a temperatura de 1000°C, permanecendo ainda sob essa temperatura durante duas horas. O resfriamento foi ao ar livre e a broca boretada. A camada boretada foi o primeiro revestimento nesse caso, porque ela tem a possibilidade de servir também como base de aderência para o revestimento subsequente de TiN.

O revestimento de TiN foi realizado por uma empresa especializada chama-se BODYCOTE BRASIMET, pois não há equipamentos e materiais no Câmpus do IFSC e nem nos Câmpus da região para realizar esse revestimento. O resultado do TiN pode ser observado na Figura 19.

FIGURA 19: Broca Bor_TiN



Fonte: o autor (2016)

3.1.1.4 Brocas com Nitreto de Titânio (TiN)

O quarto grupo, já possui revestimento comercial, foi escolhido para servir como base de referência para avaliar o seu desempenho em relação aos demais tipos de brocas revestidas. A Figura 20 apresenta a broca helicoidal com esse revestimento.

FIGURA 20: Broca TiN

Fonte: o autor (2016)

3.2 BLOCO DE ENSAIO

Os blocos serviram como corpo de prova para os ensaios de furação. Para isso, foram adquiridas sete barras retangulares do ferro fundido cinzento, de tamanho 120X50X1480mm, que foram cortadas e transformadas em 24 peças de tamanho 120X50X490mm (Figura 21). Isso foi feito porque o curso da máquina no eixo "x" é limitado em 600mm.

FIGURA 21: Bloco de ensaio

Fonte: o autor (2016)

O material utilizado para os corpos de prova foi o ferro fundido cinzento, cuja análise do material foi realizada em parceria com a empresa WEG S.A. e é apresentado na tabela 6.

TABELA 6: Composição química do ferro fundido cinzento FC300

Composição química do ferro fundido				
C	Si	Mn	P	S
3,23%	2,20%	0,724%	0,042%	0,096%

Fonte: o autor (2016)

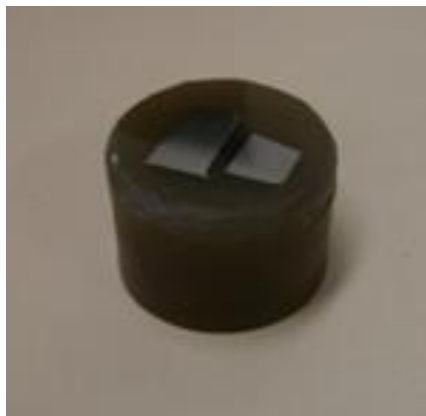
Outro ensaio realizado no material do bloco foi a medição da dureza Brinell, através de um durômetro. Utilizou-se uma esfera de 2,5mm, aplicando uma pré-carga de 10kgf e na sequência uma carga de 187,5 kgf. Os resultados mostraram que a amostra possui uma dureza de 190HB com desvio padrão de 5,56HB.

Este material foi escolhido por suas características que possibilitam a usinagem a seco e a excelente quebra de cavaco, devido à formação do tipo de grafitas. Além disso, seu campo de aplicação é bastante vasto, podendo ser utilizado para a fabricação de diversos produtos (GUESSER, 2009).

3.2.1 Análise microestrutural do bloco de ensaio

A análise microestrutural foi realizada para garantir a qualidade microestrutural do bloco de ensaio. Por essa razão, foram realizados dois cortes no material para a retirada de amostras, as quais foram embutidas e depois submetidas ao lixamento utilizando granulometria de lixa 80, 150, 240, 400, 600 e 1200, sucessivamente. Após o lixamento, houve o polimento utilizando alumina 0,3 μm para caracterizar o tipo de grafita (Figura 22).

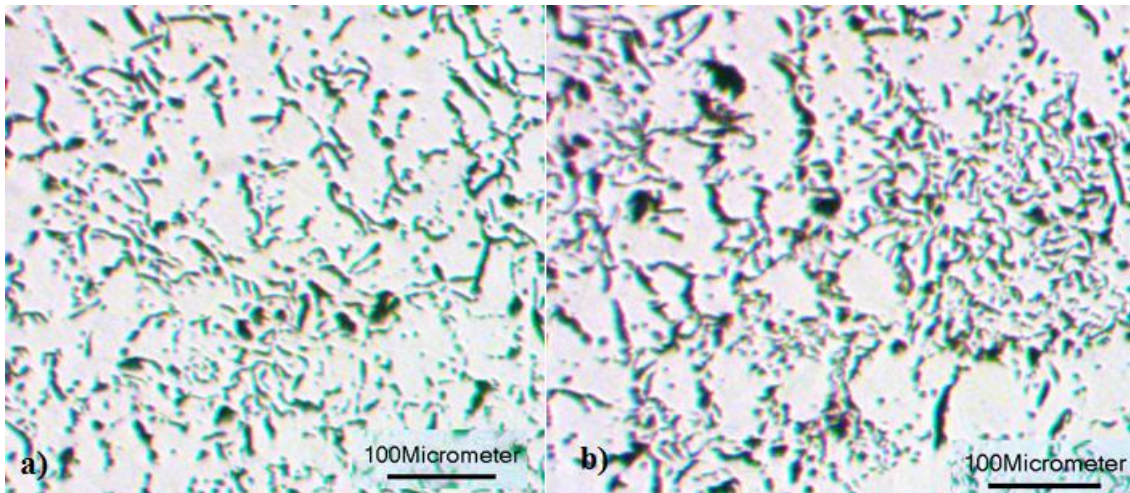
FIGURA 22: Amostras do bloco embutida com resina com diâmetro 38mm



Fonte: o autor (2016)

As imagens foram registradas através do microscópio óptico com aumento de 100X. Na figura 23 é possível observar a estrutura típica do ferro fundido cinzento, caracterizado pelos veios de grafita.

FIGURA 23: Estrutura do fofo cinzento



Fonte: o autor (2016)

3.3 PROCESSO DE FURAÇÃO

3.3.1 Parâmetros de corte

Antes do início das operações de furação foi necessário determinar os parâmetros para a usinagem. Sendo assim, foram determinadas duas velocidades de corte e duas variações de avanço que estão descritos na tabela 7. O interesse em variar os parâmetros foi necessário para identificar a melhor condição para os tipos de alterações superficiais sofridas entre as brocas com revestimento e as brocas sem revestimento.

TABELA 7: Parâmetros de corte

Parâmetros		
Condição	Vc (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	20	0.1
2	20	0.2
3	35	0.1
4	35	0.2

Fonte: o autor (2016)

A velocidade de corte (V_c) foi determinada pelo fabricante (ANEXO A). Ela varia de 20m/min a 30m/min para brocas sem revestimento na furação de materiais de ferro fundido cinzento. O V_c de 35m/min foi escolhido porque as brocas revestidas permitem velocidades de corte mais altas. Segundo Santos e Sales (2005, p. 127) “a deposição em ferramentas de corte tem a finalidade de aumentar a vida das ferramentas. Outros efeitos positivos podem ser obtidos, como o aumento da velocidade de corte”.

O avanço (f) também foi sugerido pelo fabricante (ANEXO A), mas os valores foram arredondados para 0,1mm/rot e 0,2mm/rot.

3.3.2 Meios lubrificantes

Segundo Ferraresi (1970), o processo de furação utilizando ferros fundidos pode ser feito através de óleos emulsionáveis ou a seco. Neste trabalho, foi utilizada a usinagem a seco, utilizando ar comprimido para a remoção dos cavacos. “O objetivo da condição de usinagem a seco foi de acelerar o processo de desgaste das ferramentas e viabilizar, através de dados concretos, o não emprego de fluidos lubri-refrigerantes”. (MARQUES et al. , 2015, p.92).

3.3.3 Metodologia de furação

No processo de furação com brocas de aço rápido, pretendeu-se analisar o desgaste de flanco das brocas boretadas e boretadas + TiN em comparação com as brocas sem revestimento e com revestimento de TiN.

A metodologia para a usinagem por furação pode ser observada na tabela 8, onde encontram-se os 4 grupos de revestimentos, cada qual com parâmetros de corte pré-definidos. Foram estipulados 16 tipos de ensaios e, para cada um deles, foram feitas três réplicas para garantir a média dos resultados, totalizando 48 brocas.

TABELA 8: Descrição da metodologia de furação

METODOLOGIA DE FURAÇÃO				
	Revestimento	Parâmetros		
Ensaio	Grupo	Condição	Vc (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	1 (SR)	1	20	0.1
2	1(SR)	2	20	0.2
3	1(SR)	3	35	0.1
4	1(SR)	4	35	0.2
5	2(Bor)	1	20	0.1
6	2(Bor)	2	20	0.2
7	2(Bor)	3	35	0.1
8	2(Bor)	4	35	0.2
9	3(Bor_TiN)	1	20	0.1
10	3(Bor_TiN)	2	20	0.2
11	3(Bor_TiN)	3	35	0.1
12	3(Bor_TiN)	4	35	0.2
13	4(TiN)	1	20	0.1
14	4(TiN)	2	20	0.2
15	4(TiN)	3	35	0.1
16	4(TiN)	4	35	0.2

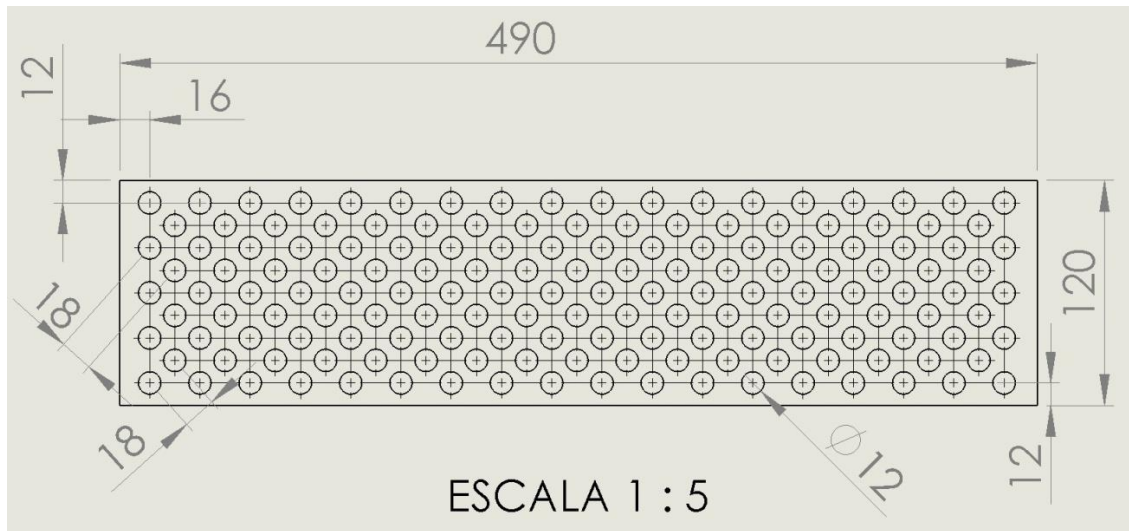
Fonte: o autor (2016)

As usinagens não foram realizadas seguindo a sequência contida na tabela 8. Para garantir que as condições de temperatura do ambiente, máquina, energia, umidade, entre outros, não influenciassem nos resultados das brocas, diminuindo a probabilidade de erros, houve um sorteio aleatório para cada ensaio.

Para a usinagem, o corpo de prova foi fixado na mesa da máquina com o uso de uma morsa. A primeira operação aplicada para cada bloco de ensaio foi a pré-usinagem na face do bloco, com a retirada de dois milímetros de sobremetal para eliminar qualquer irregularidade da superfície, a qual pode alterar a vida útil da ferramenta. É preciso levar em conta que a superfície do bloco possui uma camada de maior dureza, devido ao processo de fundição que a peça sofre em sua fabricação (SANTOS et al. , 2013).

Após as peças serem devidamente usinadas, iniciou-se o processo de furação baseado no esquema da figura 24.

FIGURA 24: Esquematização das furações



Fonte: o autor (2016)

O *layout* otimizado permitiu a realização de 158 furos de diâmetro 12mm, numa distância entre centros de 18mm, aplicando a lógica utilizada por Andrade (2005), Oliveira (2008) e Teixeira (1995), na qual a distância entre centros dos furos deve ser de uma vez e meia o diâmetro do furo utilizado.

A profundidade dos furos foi de 42mm, caracterizando furação curta. A utilização da furação é tratada por Diniz et al. (2013) que explica que quando a relação da profundidade (L) do furo e do diâmetro (D) do furo for maior do que cinco ($L/D > 5$) caracteriza furação profunda e necessita de brocas especiais. Do contrário, a furação é caracterizada por curta.

A profundidade de 42mm para furação foi escolhida pelo cálculo da relação de três vezes e meio o diâmetro do furo com aproveitamento máximo da espessura do bloco que era de 50mm.

O tipo de furação utilizada foi a furação em cheio sem pré-furo. Houve também a utilização de ciclos de reversão, chamados de “pica-pau”, que consistem em movimentos verticais alternados da broca, com aprofundamentos de 5mm em 5mm. De acordo com Diniz et al. (2013) e Bork (1995), este tipo de ciclo é utilizado para esvaziar os canais de saída do cavaco.

3.4 ENSAIOS

3.4.1 Máquina ferramenta

Os ensaios foram realizados em uma fresadora CNC de quatro eixos da marca Romi modelo D600 mostrada na (figura 25), instalada no laboratório do IFSC - Câmpus Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus. A máquina possui o eixo-árvore (*spindle*) na vertical com rotação de 7000rpm com potência de 15KW/ 20cv, cone do eixo árvore ISO 40 e comando FANUC Series Oi-MC.

FIGURA 25: Máquina ferramenta



Fonte: o autor (2016)

3.4.2 Medição de desgaste

O primeiro passo para a realização da medição do desgaste das brocas foi a captura de imagens da ponta das brocas, ou seja, registrar as arestas de corte através de fotos (uma foto por aresta). As fotos foram feitas utilizando-se uma *webcam* de conexão USB e adaptada a uma lente de aumento de 10x, como mostra a figura 26.

FIGURA 26: Demonstração da câmera utilizada no registro de dados



Fonte: o autor (2016)

A câmera foi fixada em um tripé e as brocas montadas em um cone de fixação e encaixadas num flange adaptado na bancada de trabalho, conforme a figura 27. A broca ficou 120mm afastada do cone em relação à sua ponta. Procurou-se manter a câmera numa inclinação de 31° , para que ficasse paralela à aresta principal de corte, evitando a distorção ou erros na imagem gerada como recomenda Marques (2012).

Os registros das imagens foram feitos em cada uma das 48 brocas, as brocas eram montadas uma de cada vez. A primeira foto era tirada antes da furação iniciar e uma nova foto era feita a cada dez furos, realizados até atingir a quantidade de 90, o que caracteriza o fim de vida da ferramenta.

O critério de fim de vida foi estabelecido em 90 furos observando-se outros estudos da área, como demonstram Marques (2012) e Santos et al (2013). Foi possível identificar que a maioria das brocas sem revestimento quebrava ou emitia ruído excessivo quando atingia a quantidade de 100 ou mais furos.

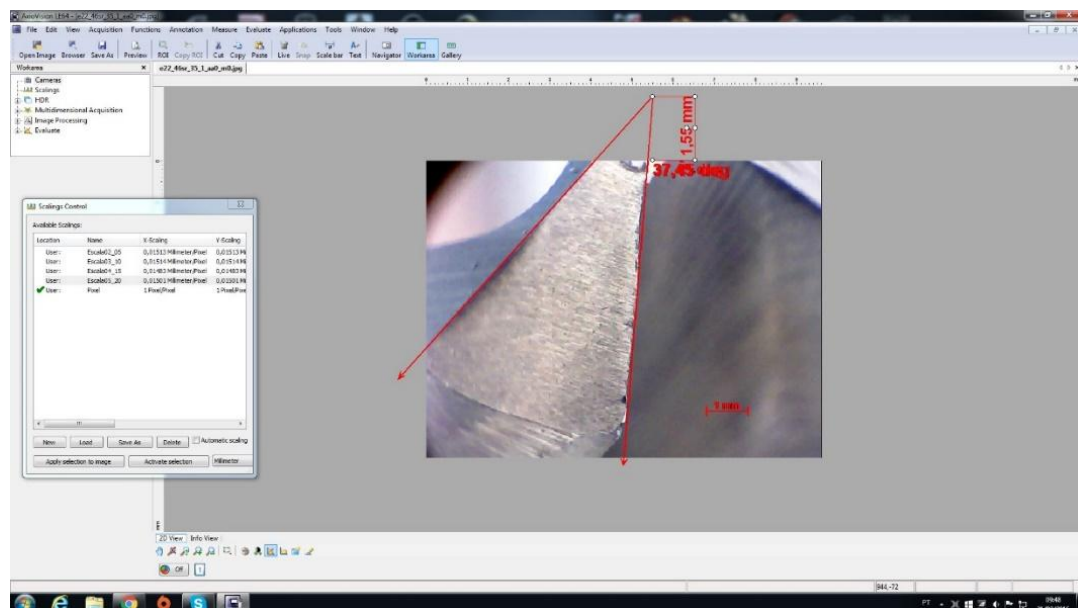
FIGURA 27: Demonstração do posicionamento câmera-broca



Fonte: o autor (2016)

A medição de desgaste foi realizada através da medição nas fotos utilizando o *software Axion Vision* (Figura 28). A partir do software, foi possível criar referências através de linhas e alinhar o desgaste de flanco na broca para medição, quando necessário.

FIGURA 28: Demonstração da do *software Axion Vision*



Fonte: o autor (2016)

3.4.3 Dureza das brocas

O ensaio de dureza foi realizado para observar as durezas das brocas, com o auxílio do durômetro mostrado na figura 29, com identador cônico de diamante, pré carga de 10Kgf, em seguida sob carga de 150kgf. Os resultados foram realizados na escala de dureza *Rockwell C* (HRC).

Para cada broca foi realizada uma indentação no meio do corpo da ferramenta, totalizando 48 indentações.

FIGURA 29: Durômetro



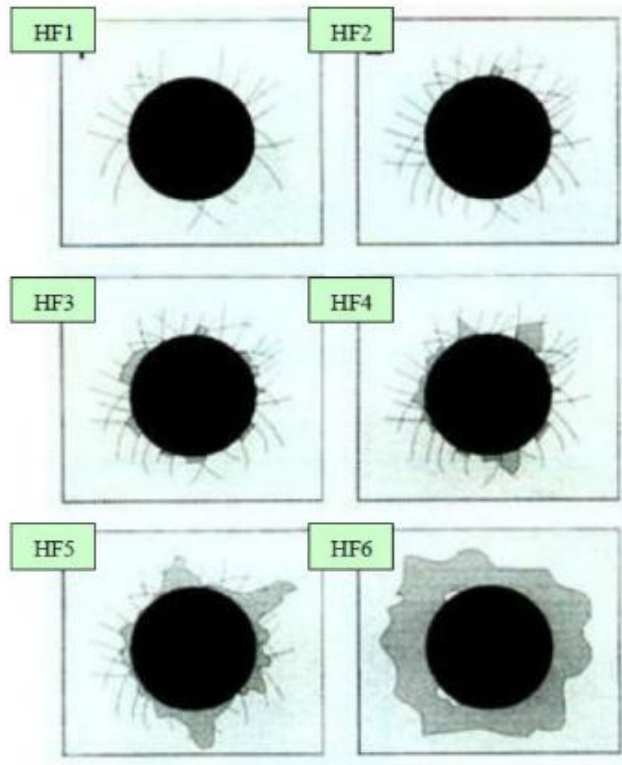
Fonte: o autor (2016)

3.4.1 Teste de adesividade

Este teste avalia a qualidade da adesão do revestimento na broca. O teste também é realizado através de indentações gerados pelo durômetro com o mesmo método de resultados de *Hard Rockwell C* (HRC). As indentações aplicadas nas ferramentas provocam falhas nas camadas superficiais e avarias. Através de imagens geradas pelo microscópio óptico são

classificadas de acordo com as impressões padrão de acordo com a norma VDI 3198, conforme a figura 30.

FIGURA 30: Padrões de adesividade



Fonte: Norma VDI 3198 (VDI,1991 *apud* Marques, 2012, p. 37)

As impressões HF1 até HF4 são consideradas "ideias." Já as impressões HF5 e HF6 são consideradas insuficientes, caracterizadas pelo destacamento da camada.

Para o presente trabalho, foram realizadas 48 identificações, ou seja, uma identificação por broca, no sentido longitudinal da ferramenta.

3.4.2 Caracterização de camada

A caracterização da camada foi realizada para identificar, medir a espessura de camada e microdureza. Nesse sentido, foram submetidas aos testes uma amostra de cada grupo de brocas.

O primeiro passo foi niquelar as brocas, a niquelação foi realizada em uma solução de sulfato de zinco sendo o anodo, uma placa de níquel puro e o cátodo a peça a ser revestida, foi aplicada tensão de 9 VDC por 10 min. A camada de níquel serve para proteger as camadas boretas e TiN para que não quebrassem durante o corte e o lixamento. Após a niquelação, houve a retirada das amostras de cada broca através de um corte paralelo no seu diâmetro. Em

seguida, houve o embutimento e o lixamento utilizando granulometria de lixa de 80, 150, 240, 400, 600 e 1200 sucessivamente. Logo após houve o polimento utilizando alumina 0,3 μm , por fim analisadas com ou sem ataque com Nital 2%.

As amostras foram avaliadas por imagens geradas pelo microscópio óptico. Foram medidas suas espessuras de camadas boretadas e TiN e também foram observadas as morfologias das camadas formadas.

A obtenção da dureza foi feita utilizando um microdurômetro (Figura 31) com resultados em *Hardness Vickers* (HV). Os ensaios de microdureza foram realizados sob carga de 50 gf durante 10 segundos. Foram coletadas medições feitas na camada, no substrato abaixo da camada (aproximadamente 20 μm de distância) e no centro da broca.

FIGURA 31: Microdurômetro



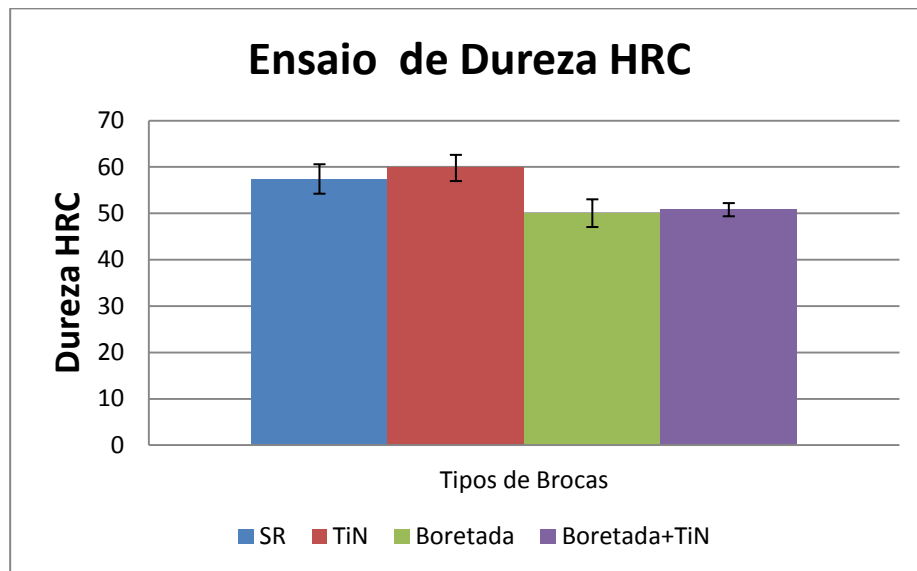
Fonte: o autor (2016)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 DUREZA DAS BROCAS

Os resultados do ensaio de dureza podem ser observados no gráfico 1.

GRÁFICO 1: Resultado de dureza



Fonte: o autor (2016)

De acordo com os resultados exibidos no gráfico, as brocas revestidas com TiN tiveram melhores resultados, ao atingirem o valor de 60HRC, próximo das brocas sem revestimento que estão um pouco mais abaixo, com 58HRC. As brocas boretadas e boretadas+TiN tiveram dureza de aproximadamente 50HRC.

A menor dureza das brocas boretadas e boretadas+TiN pode ser explicada pelo tratamento de boretção, quando realizado em temperatura de 1000°C por 2 horas. Além do material da broca receber a camada boretada, ocorre abaixo dela algo parecido com o processo de recozimento, resultando na diminuição da sua dureza, a sua estrutura é alterada devido a fusão do átomo de boro (presentes no pó) com o átomo de Fe (material da broca) para formar a camada, alterando a estrutura martensítica o que pode ter comprometido o substrato da broca.

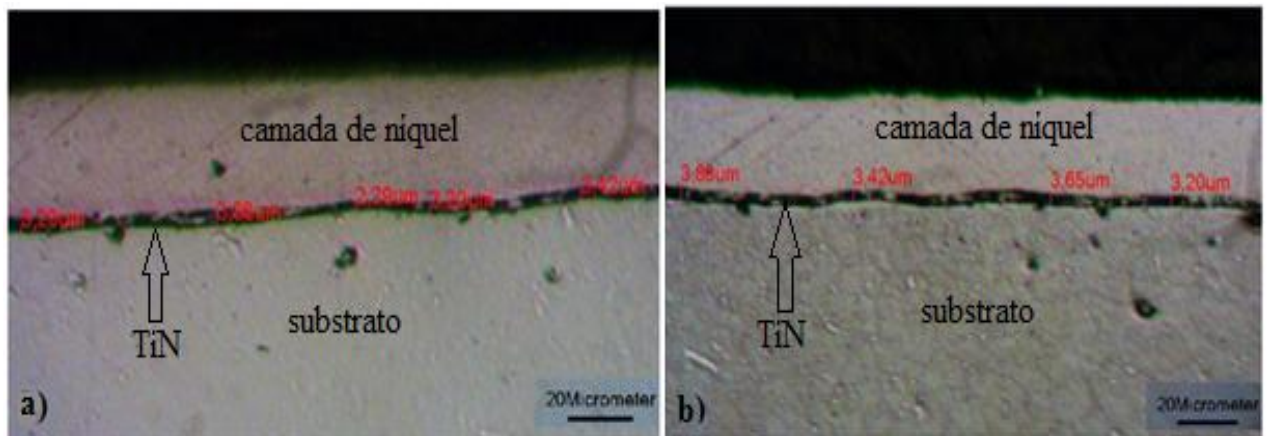
Não foi previsto esta possibilidade de haver essa alteração na estrutura, que compromete-se a dureza no substrato, o processo de revestimento de boretção em ferramentas é algo novo, até em então não se sabia seu comportamento e os resultados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS

4.2.1 Caracterização da camada das brocas revestidas de TiN

A partir da figura 32 é possível observar a camada da broca revestida com TiN, onde em **a)** encontra-se a amostra sem o ataque e em **b)** encontra-se a amostra atacada com Nital 2%. O valor médio da espessura da camada é de $3,3\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,45\mu\text{m}$. Conforme comentam Santos e Sales (2007), na tabela 2 apresentada anteriormente na revisão de literatura pág. 34, a espessura da camada de TiN varia de $1,5\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$, a camada revestida está um pouco acima, mas é aceitável.

FIGURA 32: Demonstração das camadas TiN



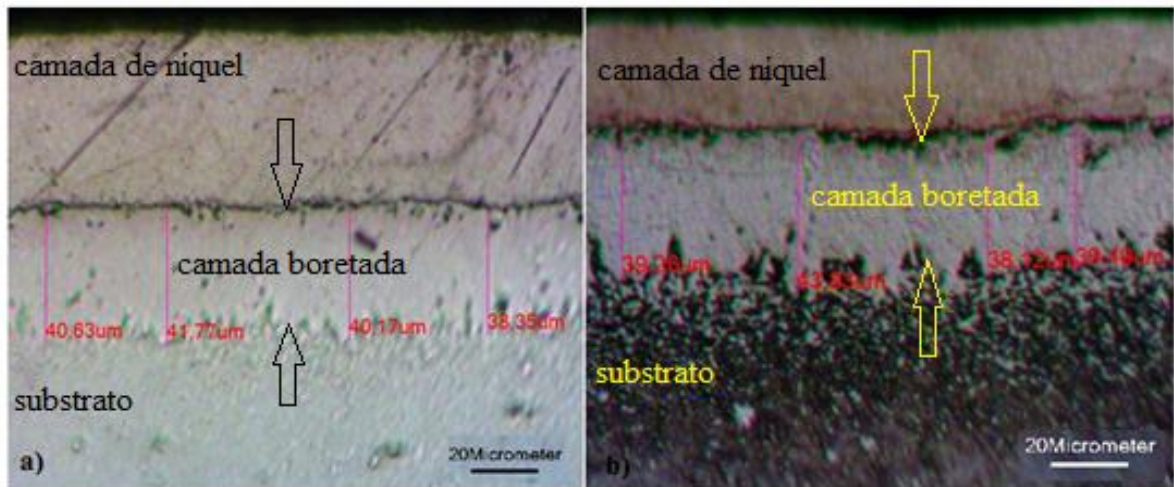
Fonte: o autor (2016)

A microdureza do revestimento de TiN não foi possível realizar, pois não há área suficiente para medir, com o risco de quebrar o penetrador. A microdureza medida abaixo da camada (em torno de $20\mu\text{m}$) teve uma média de $850,1\text{HV}$ ($65,3\text{HRC}$) e desvio padrão de $106,09\text{HV}$. No centro da broca a microdureza teve uma média de $810,6\text{HV}$ ($64,3\text{HRC}$), com desvio padrão de $19,19\text{HV}$.

4.2.2 Caracterização da camada das brocas boretadas

Na figura 33 é possível observar a camada da broca boretada, onde em **a)** encontra-se a amostra sem o ataque e em **b)** a amostra atacada com Nital 2%. É possível notar que a espessura média da camada de boro de $40,1\mu\text{m}$, com desvio padrão de $1,9\mu\text{m}$.

FIGURA 33: Demonstração das camadas boretadas



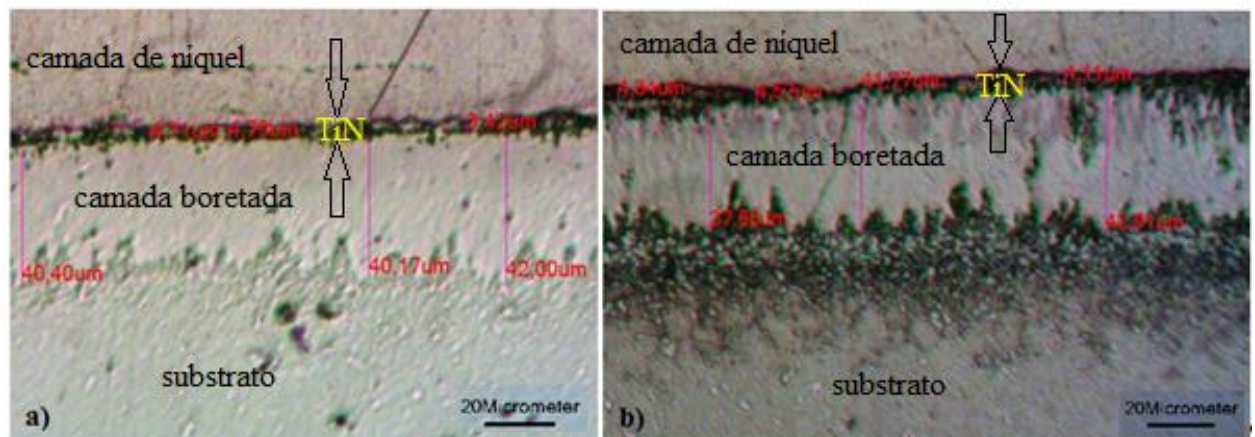
Fonte: autor (2016)

A microdureza da camada boretada teve uma média de 1484,13HV (75,1HRC) com desvio padrão de 55,03HV. A microdureza medida logo abaixo da camada teve média de 579,62HV (53,4HRC). No centro da broca a microdureza apresentou uma média 638,32HV (57,2HRC) com desvio padrão de 35,39 HV.

4.2.3 Caracterização da camada das brocas boretadas+TiN

Na figura 34 é possível identificar a camada formada por boretos e a camada de TiN, onde em **a)** encontra-se a amostra sem o ataque e em **b)** a amostra atacada com Nital 2%. É possível notar que a camada de boro possui uma espessura média de camada de 40,08µm com desvio padrão de 2,61 µm, e a espessura média da camada de TiN é de 4,45µm, com desvio padrão de 0,65 µm.

FIGURA 34: Demonstração das camadas boretadas+TiN



Fonte: o autor (2016)

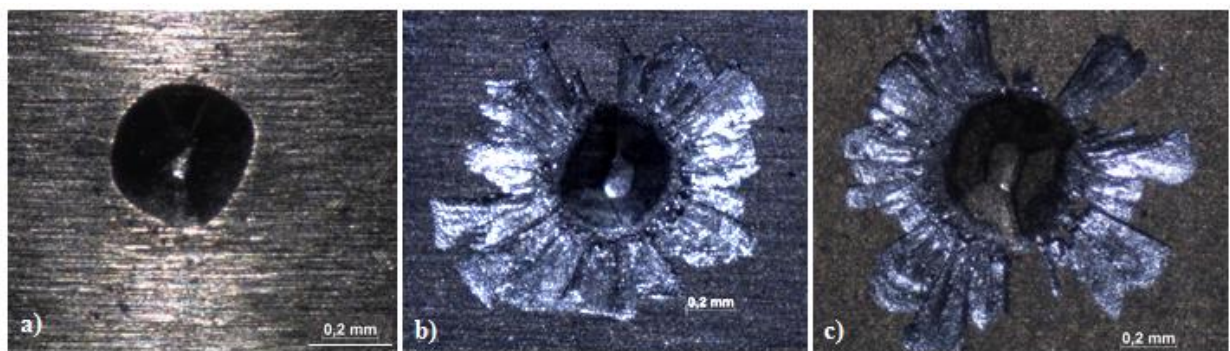
A média da microdureza da camada boretada foi de 1398,7HV (74,0HRC) com desvio padrão de 56,94HV. A microdureza medida logo abaixo da camada teve média de 581,7HV (54,2HRC) com desvio padrão de 40,15HV. No centro da broca a microdureza teve uma média de 698,4HV (60,06HRC), com desvio padrão de 22,81HV.

4.3 ADESIVIDADE

A figura 35 mostra os resultados dos testes de adesividade dos revestimentos nas brocas, em **a)** broca com revestimento TiN, em **b)** broca com revestimento de boro, em **c)** broca com revestimento de boro+TiN.

O teste de adesividade revelou que a broca com revestimento de TiN obteve a classificação HF1, ou seja, apresentou um dos melhores níveis de adesividade.

FIGURA 35: Resultado dos testes de adesividade nas brocas



Fonte: o autor (2016)

A figura 35 b) mostra o teste da adesividade da broca com revestimento boretada, que obteve classificação HF6, ou seja, apresentou resultado indesejáveis de adesividade.

Os índices foram indesejados porque teve uma diminuição de dureza no substrato devido ao tratamento de boretção como já foi explicado anteriormente. A camada boretada é dura mas é frágil e o substrato não da suporte a ela, o que explica o arrancamento ou quebra do revestimento.

A figura 35 c) mostra o teste da adesividade da broca com revestimento boretada+TiN, que também obteve classificação HF6, ou seja, apresentou resultado indesejável de adesividade, tal como na broca boretada.

Pode-se afirmar que, os resultados dos testes foram apenas indicativos qualitativos, citados por Santos e Sales (2007, p. 146) " permite apenas uma análise qualitativa, baseada em

critérios subjetivos." A norma VDI3198 prevê que seja realizado a indentação em uma superfície plana, e neste ensaio foi no próprio corpo cilíndrico da broca.

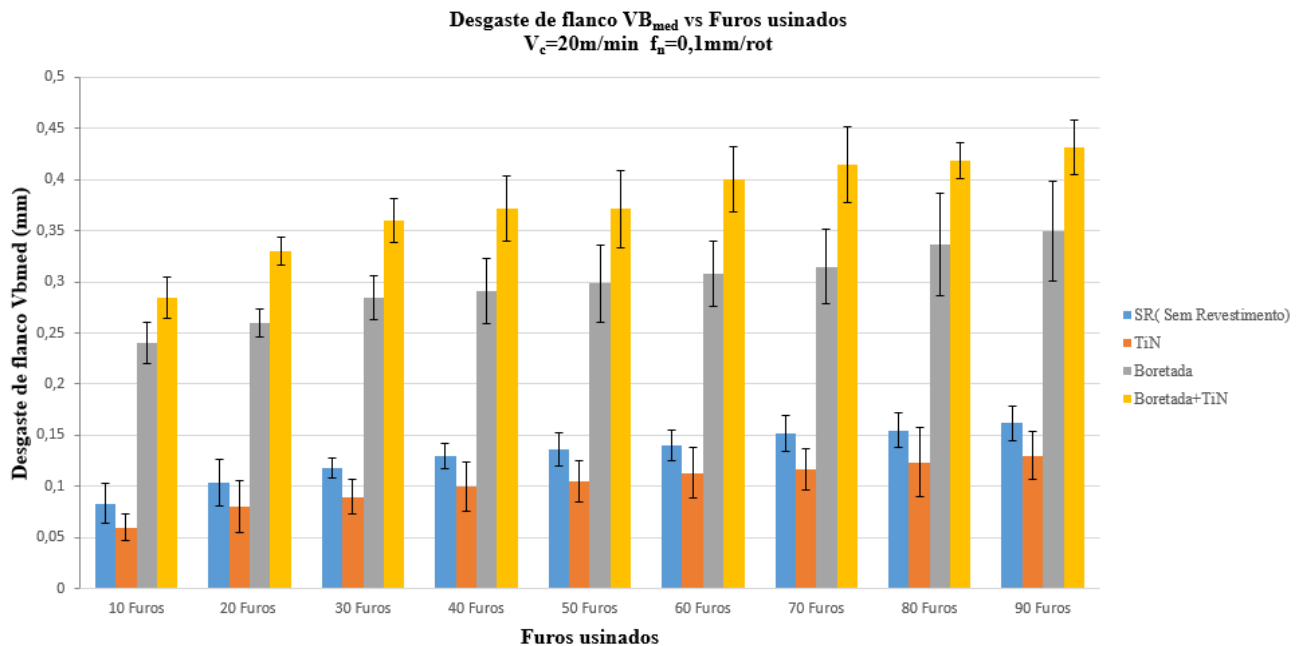
4.4 MEDIÇÃO DE DESGASTE

Os resultados de desgaste estão apresentados graficamente, sendo divididos de acordo com os parâmetros de corte especificados durante o processo de furação.

4.4.1 Condição 1 (parâmetro V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot)

O gráfico 2 compara os resultados dos quatro grupos de brocas, apresentando a evolução do desgaste de flanco em relação à quantidade de furos, com o parâmetro de corte de V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot.

GRÁFICO 2: Demonstração de desgaste com V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot



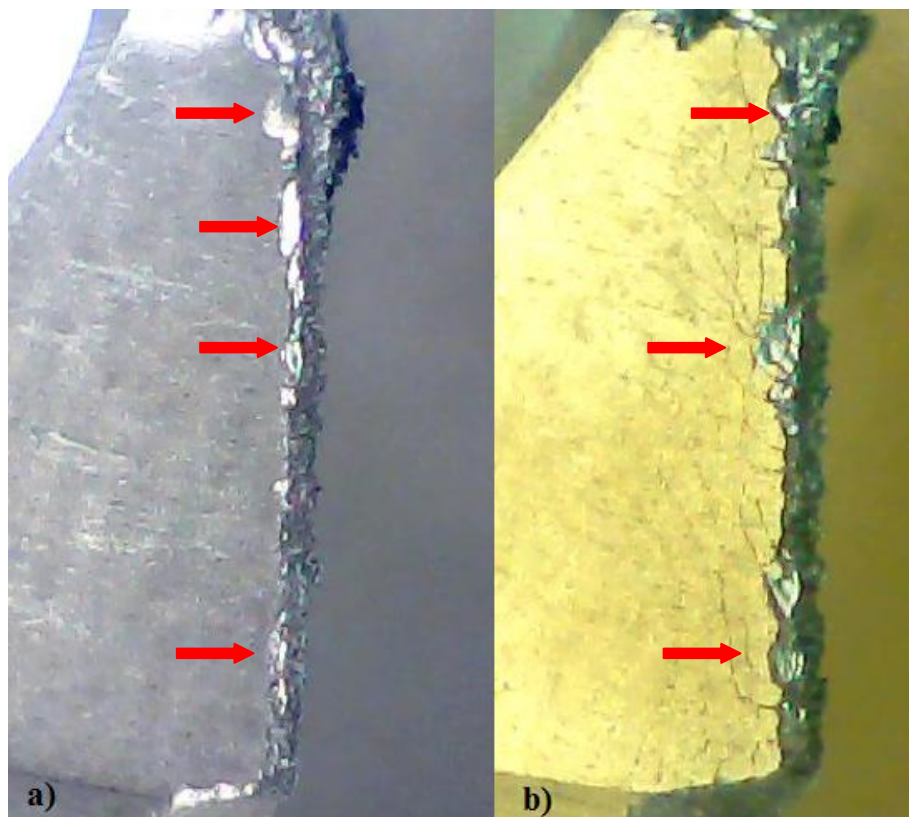
Fonte: o autor (2016)

Nessa condição as brocas sem revestimento e as brocas com monocamada de TiN desgastaram menos que as brocas que tiveram tratamento de boretagem. Houve predominância da adesão ser maior que da abrasão nas duas situações, decorrente as baixas velocidades de corte citados por Machado et al. (2012, p.278) diz que "a adesão ocorre, geralmente, as baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular." Apesar da adesão e da abrasão, ainda assim os melhores resultados ocorreram para as brocas com revestimento de TiN, seguida da broca sem revestimento

Os maiores valores de desgastes ocorreram nas brocas boretadas, tanto nas de monocamada (Bor) quanto nas de multicamadas (Bor_TiN). O desgaste foi crítico no início da usinagem (dez primeiros furos) ultrapassando 0,24 mm. Após os dez primeiros furos o desgaste foi evoluindo lentamente para as brocas boretadas, ao chegar nos 90 furos desgastou 0,35mm, sendo que nas brocas com multicamada (Bor_TiN) a evolução do desgaste foi mais acima dos valores de desgaste do que a broca boretada, terminando em 0,433mm de desgaste.

Na figura 36 é possível comparar o flanco da broca **a)** monocamada boretada com o flanco da broca **b)** com revestimento multicamada (Bor_TiN), após os dez primeiros furos. Em **a)** identificaram-se regiões com mecanismos de abrasão e adesão, que podem ter causado o arrancamento da camada (setas destacadas em vermelho). Na broca multicamada em **b)** além dos mecanismos de desgastes por abrasão e adesão surgiram trincas no revestimento.

FIGURA 36: Comparativo do desgaste de flanco da camada boretada e boretada+TiN



Fonte: o autor (2016)

Esses fenômenos que ocorreram nas brocas boretadas e nas brocas boretadas+TiN pode ser explicado, pois no ensaio de dureza, caracterização da camada e da adesividade do revestimento revelou que apesar da camada ser dura ela é frágil e o substrato não da suporte por

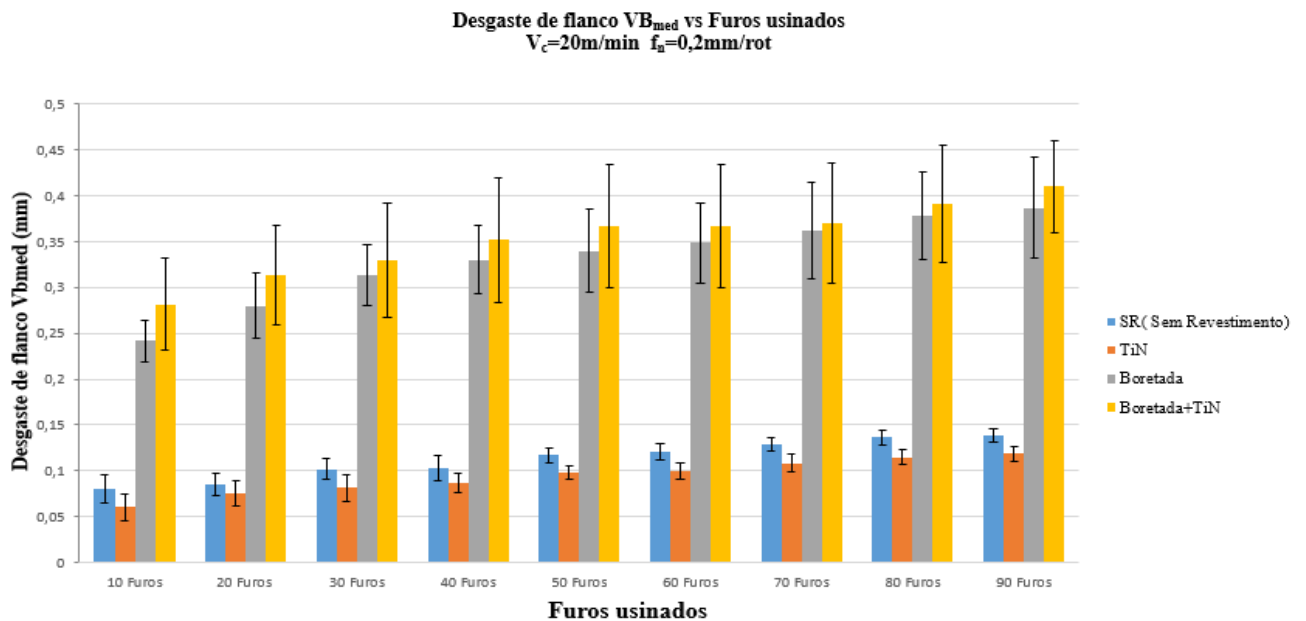
ser menos duro, o que afeta a estrutura, gerando arrancamento ou quebra da camada boretada, aumentando a área de atrito, temperatura e de esforços mecânicos.

Santos e Sales (2007) diz que com a perda de ângulo de folga gerado pelo desgaste do flanco, reflete num aumento da superfície de contato da ferramenta com material, gerando naquela região mais atrito e Diniz (2013) diz que as trincas podem ser provocadas pela temperatura e/ou de esforços mecânicos.

4.4.2 Condição 2 (parâmetro V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot)

O gráfico 3 compara os resultados dos quatro grupos, apresentando a evolução do desgaste de flanco em relação à quantidade de furos no parâmetro de corte de V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot.

GRÁFICO 3: Demonstração de desgaste com V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot



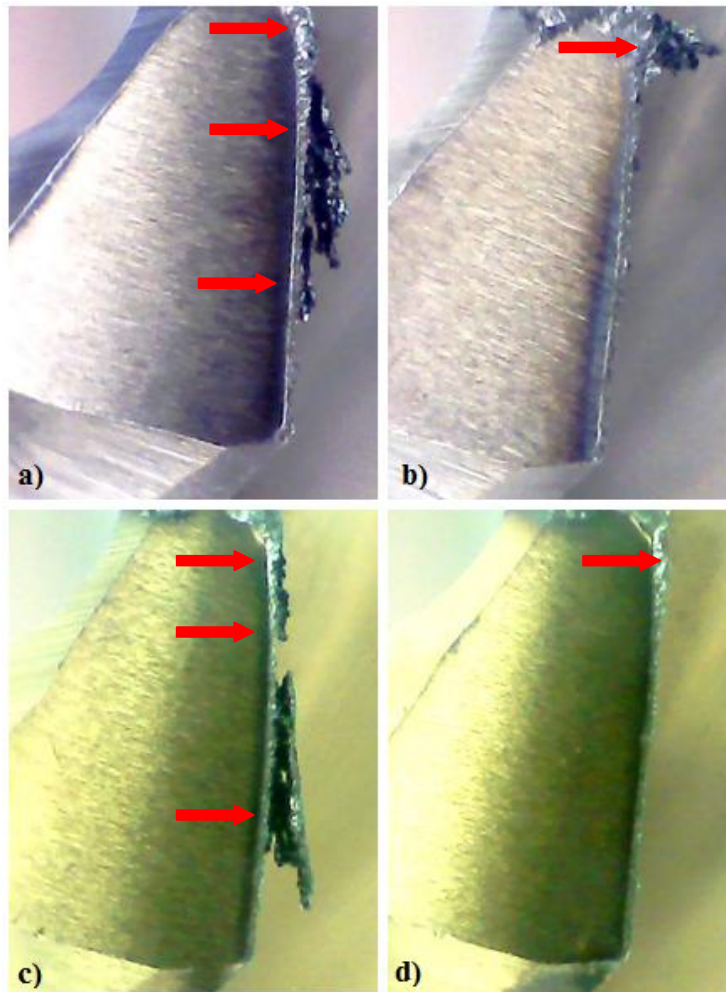
Fonte: o autor (2016)

Nessas condições, as brocas sem revestimento e as com revestimento de TiN, tiveram desgaste menor do que na condição de V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot.

Esse fato pode ser explicado devido ao aumento da velocidade de avanço de 0,1mm/rot para 0,2mm/rot. Isso ocorre porque a ferramenta arrancou mais material, não resultou em cortes irregulares ocasiona o surgimento de fragmentos microscópicos, que são arrancado da superfície da ferramenta e são arrastado junto com o fluxo do material (DINIZ et al., 2013; FERRARESI, 1970; SOUZA, 2011; MACHADO et al. , 2012).

Na figura 37 pode ser observada a diferença de adesão nas brocas, após ensaiadas. Em a) mostra a broca sem revestimento (V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot), em b) a broca sem revestimento (V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot), em c) a broca com revestimento de TiN (V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot e em d) a broca com revestimento de TiN (V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot). Destacado através de setas vermelhas a identificação de mecanismos de adesão.

FIGURA 37: Comparativo do parâmetro de avanço



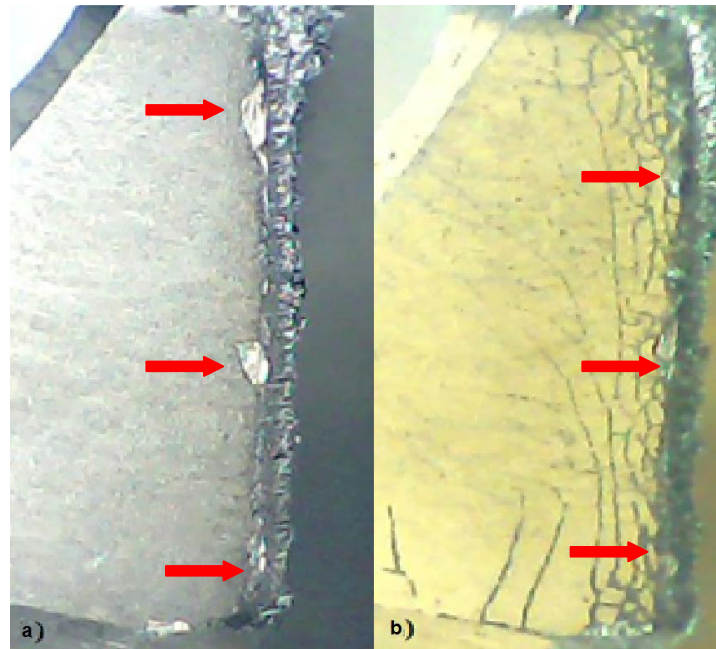
Fonte: o autor (2016)

Com V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot as brocas boretadas e boretadas+TiN tiveram valores de desgaste semelhante à condição de V_c 20m/min e f_n 0,1mm/rot. Porém, a broca boretada+Tin diminuiu em média 0,02 mm e a boretada aumentou 0,03mm no desgaste de flanco.

Comparando os desgastes da figura 36, da mesma forma com a figura 38, após os dez primeiros furos demonstra-se que em a) a broca boretada também teve adesão e abrasão

gerando um arrancamento da camada. Na condição **b)** a broca boretada+TiN apresentou mais trincas por ter mais esforço de corte devido ao aumento do avanço.

FIGURA 38: Demonstração do arrancamento de camada e formação de trincas



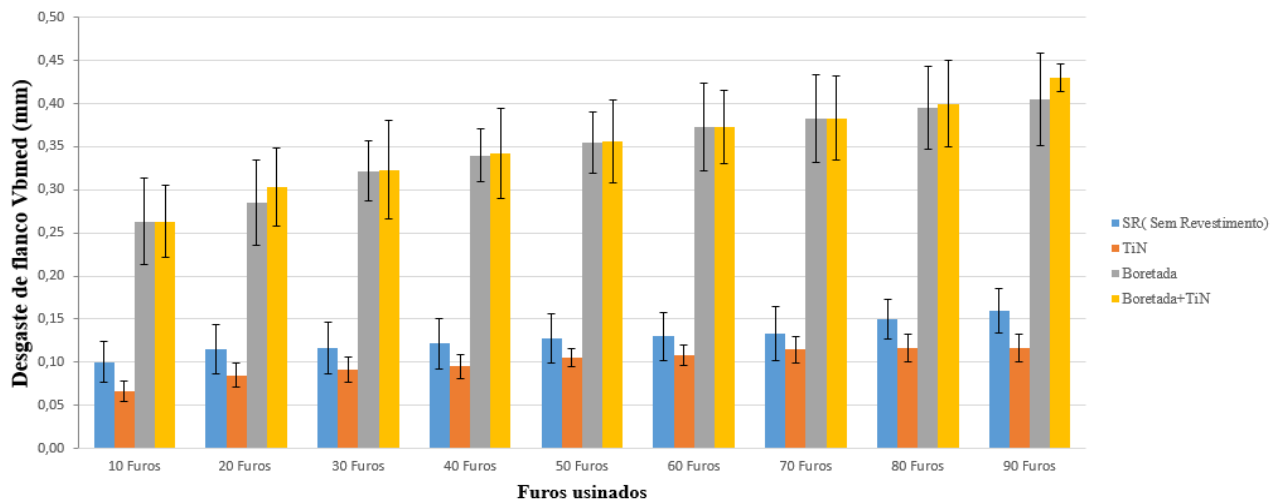
Fonte: o autor (2016)

4.4.3 Condição 3 (parâmetro V_c 35m/min e f_n 0,1mm/rot)

Os resultados da terceira condição podem ser vistos no gráfico 4 com V_c de 35m/min e f_n de 0,1mm/rot.

GRÁFICO 4: Demonstração de desgaste com V_c 35m/min e f_n 0,1mm/rot

Desgaste de flanco VB_{med} vs Furos usinados
 $V_c=35m/min$ $f_n=0,1mm/rot$



Fonte: o autor (2016)

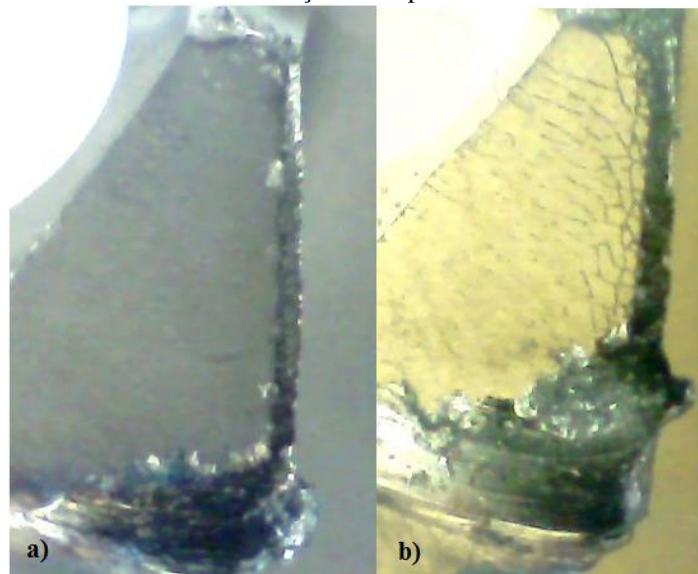
O valores ilustrados no gráfico 4, mostraram que as brocas sem revestimento, por utilizarem parâmetros mais altos, neste caso a velocidade de corte de 35m/min, apresentaram mais desgaste no final com valor de desgaste de 0,165mm

Os valores de desgaste das brocas revestidas de TiN apresentaram melhores resultados do que nas condições anteriores com velocidades de corte mais baixas. Isso ocorreu porque o revestimento TiN permite o aumento das velocidades de corte (SANTOS E SALES, 2007).

Os resultados de desgaste do gráfico 4 das brocas boretadas e boretadas+TiN, também foi semelhante às condições anteriores (condição 1 e condição 2). A broca boretada apresentou um aumento em média 0,02mm e a broca boretada+TiN diminuiu 0,01em média, o que resultou num desgaste de flanco com menos diferença entre elas.

Nesta condição houve também o termino duas situações (brocas), em que o critério de fim de vida por ruído excessivo da broca no momento da furação, uma broca boretada e uma broca boretada+TiN. A broca boretada teve o fim de vida no 53° furo, antes de completar o ciclo total de 90 e a boretada+TiN no 89°. Pode-se observar na figura 39, que houve a perda da aresta de corte para ambas. Como já foi explicado anteriormente, a quebra da camada, com o aumento do V_c de 35m/min neste caso, acaba gerando mais calor, em contrapartida afetando as arestas de corte.

FIGURA 39: Demonstração do rompimento da aresta de corte

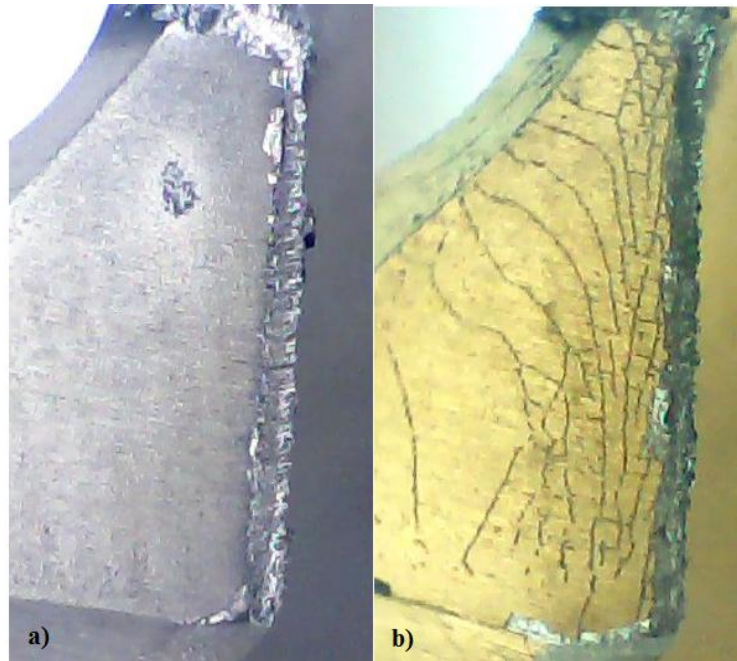


Fonte: o autor (2016)

Da mesma forma que nas condições anteriores (todas), é feito o comparativo dos dez primeiros furos das brocas boretadas e boretadas+TiN. Na figura 40 apresenta em **a)**

observa-se a broca boretada na qual houve desgaste por adesão mais no centro e predominância de desgaste por abrasão num todo. Em **b)** encontra-se a broca boretada+TiN com desgaste por adesão concentrado no centro da broca. O desgaste por abrasão também predominou, assim como o aparecimento acentuado de trincas.

FIGURA 40: Demonstração do desgaste por abrasão e surgimento de trinca para boretada+TiN

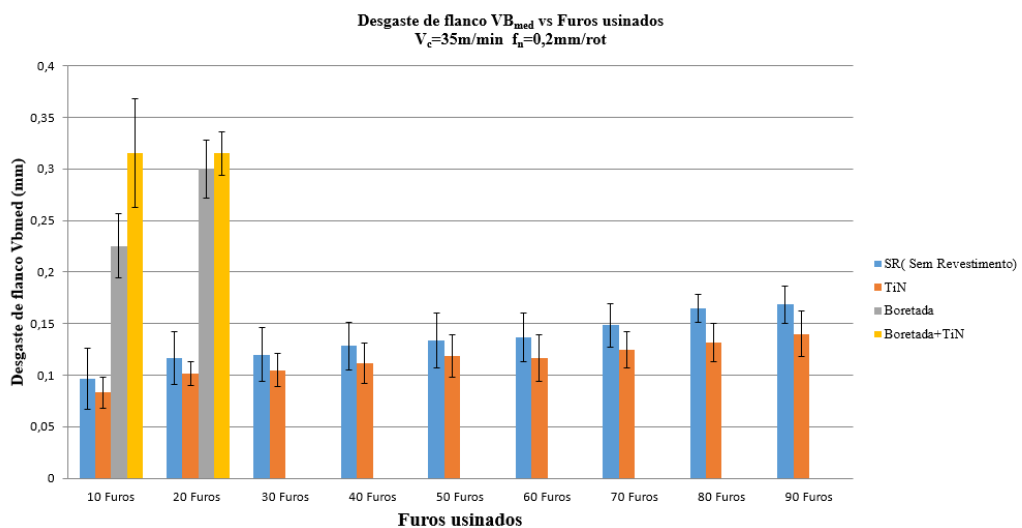


Fonte: o autor (2016)

4.4.4 Condição 4 (parâmetro V_c 35m/min e f_n 0,2mm/rot)

O gráfico 5 apresenta os resultados com V_c de 35m/min e f_n de 0,2mm/rot.

GRÁFICO 5: Demonstração de desgaste com V_c 35m/min e f_n 0,2mm/rot



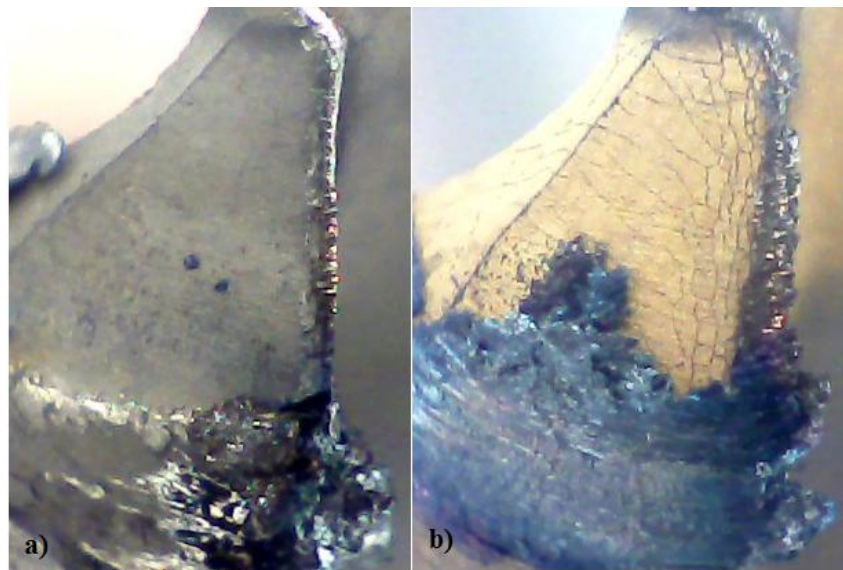
Fonte: o autor (2016)

De acordo com os valores do gráfico 5 as brocas sem revestimento tiveram um aumento de desgaste em torno de 0,02 a 0,04mm, comparado com os resultados anteriores, devido aos parâmetros de corte estar acima dos adequados, (de acordo com o fabricante entre V_c de 20m/min a V_c de 30m/min, que são encontrados no Anexo A).

As brocas com revestimento de TiN tiveram um acréscimo de 0,01mm de desgaste em relação ao resultado anterior ilustrado no gráfico 4, tanto na condição V_c de 35m/min e f_n de 0,1mm/rot quanto na condição de V_c de 35m/min e f_n de 0,2mm/rot, resultou menos valores de desgaste comparado com os outros resultados das condições de velocidades de corte mais baixas. Como já foi comentado por Santos e Sales (2007), uso de revestimentos é utilizado para aumentar a resistência ao desgaste, e o aumento das velocidades de corte entre outros.

Nos valores do gráfico 5 pode-se observar que as brocas boretas e boretadas+TiN aparecem somente até o 20° furo. O fato ocorreu porque as brocas chegaram ao fim de vida, identificado pelo ruído excessivo apresentado por causa da perda da aresta de corte, conforme demonstra a figura 41, onde em **a)** tem-se a broca boretada e em **b)** a broca boretada+TiN.

FIGURA 41: Demonstração do fim de vida das brocas boretas e boretadas+TiN



Fonte: o autor (2016)

Os resultados da condição anterior com V_c de 35m/min e f_n de 0,1mm/rot apresentada no gráfico 4, comprovaram que houve quebra de duas brocas devido à velocidade de corte maior. Agora na condição com V_c de 35m/min e f_n de 0,2mm/rot apresentados no gráfico 5, a combinação de velocidade de corte maior e o aumento do avanço, resultaram na aceleração do desgaste e nas altas temperaturas, implicando num fim de vida generalizado, apresentado já no início do processo de furação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados, conclui-se que as brocas sem revestimento mantiveram sua integridade durante o processo de ensaio, ou seja, realizaram o processo de furação até 90 furos e tiveram um nível de desgaste equivalente aos parâmetros analisados. A melhor condição foi obtida com o parâmetro V_c 20m/min e f_n 0,2 mm/rot.

As brocas com revestimento TiN mostraram-se superiores a todas as brocas ensaiadas, pois foi possível completar o registro da evolução do desgaste de flanco, a caracterização de camada e a avaliação da influência dos parâmetros de corte, sendo seu melhor desempenho na condição V_c 35 m/min e f_n 0,1 mm/rot.

Tanto as brocas sem revestimento quanto as brocas com revestimento TiN, além de servirem como base de referência para a avaliação das brocas boretadas, contribuíram para melhor fazer a distinção entre suas características.

As brocas boretadas e boretadas+TiN que também foram ensaiadas, medidas, caracterizadas e avaliadas, tiveram resultados praticamente semelhantes, sendo que a espessura de camada foi próxima de 40 μ m, a microdureza da camada em aproximadamente 1478HV(75HRC) e a microdureza no substrato abaixo da camada boretada, ficou em torno de 544HV(52HRC). A diminuição da dureza no substrato abaixo da camada boretada comprometeu substancialmente sua estrutura.

Ambas as brocas boretadas e boretadas+TiN foram ensaiadas e avaliadas nas condições de V_c 20m/min f_n 0,1mm/rot e V_c 20m/min e f_n 0,2mm/rot, e apresentaram um desgaste na faixa de 0,24mm a 0,43mm. Ressalta-se que não houve perdas de arestas de corte. Já na condição V_c 35m/min e f_n 0,1mm/rot, houve influência do parâmetro de corte ocasionando algumas perdas de arestas de corte, resultando no não cumprimento do processo. Por fim, a condição V_c 35m/min e f_n 0,2mm/rot gerou o fim de vida das brocas antes do previsto.

Este estudo contribuiu para avaliar a boretção em brocas de aço rápido, além de conhecer melhor as influências dos parâmetros de corte, mecanismos de desgaste, metodologia de ensaios, entre outros aspectos. Nesse sentido, o trabalho tornou possível compreender que existem fatores que influenciam na vida útil da ferramenta, demonstrando que o tratamento de boretção parece não ser o mais indicado para a aplicação em brocas com o objetivo de reduzir o seu desgaste.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Cássio Luiz Francisco de. **Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAIN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) USFC. Florianópolis, 2005.

ASM INTERNACIONAL. **ASM Handbook**. V. 4 – Heat Treating, 1991.

BORCK, Carlos Alberto Schuch. **Otimização de variáveis de processo para a furação de aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**, 1995. 127f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

CASTILLO, Willian Jefferson González. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**, 2005. 134f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais** 8. Ed. Artiliber, 2013.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. Blucher, 1970. 751p.

FORTUNATO, Fernando Aparecido Pacheco da Silva, **Medição do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido por meio do uso de um dispositivo a laser**, 2012. 142f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE.

GUESSER, Wilson Luis. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos** 1. Ed. Blucher, 2009. 336p.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. Blucher, 2012. 397p.

MARMENTINI, Mozart Marcos. **Análise da furação do ferro fundido nodular utilizando brocas helicoidais de M2 nitretadas**. 2009. 111 f.. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pesquisa e Pós Graduação, Universidade Tecnológica do Paraná.

MARQUES, Fernando Michelin; ROCHA, Alexandre da Silva; CAVALER, Luis Carlos de Cesaro; CURI, Elvys Isaias Mercado. **Caracterização de desgaste de brocas de HSS revestidas com AlCrN e não revestidas, em ensaios de furação, na usinagem de ferro fundido nodular DIN GGG 50.** Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 19, N°1, p. 87-104, 2015.

MARQUES, Fernando Michelin. **Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50,** 2012. 91 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Influência da geometria de brocas na furação do ferro fundido vermicular,** 2008. 173f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

OLIVEIRA, Valter Vander de; BERKENBROCK, Ernesto; ARIAS, Marcelo Luis; SOUZA, Adriano Fagali de; BELTRÃO, Paulo André de Camargo. **Influência do revestimento na vida útil de brocas de metal duro na usinagem do aço AISI P20.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010. 8p.

PETROVA, R. S.; SUWATTANANONT, N.; SAMARDZIC, V. **The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications.** Journal of Materials Engineering and Performance, V. 17, n 3 p. 340-345, 2008.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológico da usinagem dos materiais.** 1.Ed. Artiliber, 2007. 246p.

SANTOS, Emerson Miranda; KIEKOW, Flávio; CASARIN, Joviano Janjar. **Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido (HSS) modificadas superficialmente por nitretação a plasma.** Revista Eletrônica de Extensão da URI. Vol. 9, N°16, p. 68-76, Maio/2013.

SINHA, A. K. Boriding (Boronizing). **ASM Handbook,** ASM International, v.4, p.437-447, USA, 1991.

SOUZA, André João de. **Processo de fabricação por usinagem.** Apostila, 2011. 89 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II.** 3. ed. da UFSC, 2007. 314p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II**. 3. ed. da UFSC, 2005. 314p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. da UFSC, 1993. 249p.

TEIXEIRA, Cleiton Rodrigues. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos ferros produzidos**, 1995. 109 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

ANEXO A

BROCAS HELICOIDAIS HSS
RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃOwww.tdc-tools.com.br
55.11.5686.7172**TDC**

BROCAS HELICOIDAIS EM AÇO RÁPIDO		
	DIN 338	REF 810/B
	DIN 340	REF 830/B
	DIN 345	REF 820-B
	PARA CENTRAR	DIN 333A

VELOCIDADE DE CORTE (VC) PARA BROCA HSS

MATERIAIS FERROSOS

MATERIAL	DUREZA BRINELL	VC M/MIN.	LUBRIFICANTE
AÇO CARBONO	100 - 180	20 - 32	ÓLEO SOLÚVEL / ÓLEO DE CORTE
AÇO FUNDIDO	250	12 - 20	ÓLEO SOLÚVEL / ÓLEO DE CORTE
AÇO PARA FERRAMENTA	180 - 210	15 - 20	ÓLEO SOLÚVEL / ÓLEO DE CORTE
AÇO INOXIDÁVEL		5 - 12	ÓLEO DE CORTE
FERRO FUNDIDO	NOOULAR	30 - 45	SECO, OU ÓLEO SOLÚVEL
	CINZENTO	20 - 30	SECO, OU ÓLEO SOLÚVEL

MATERIAIS NÃO FERROSOS

MATERIAL	VC M/MIN.	LUBRIFICANTE
COBRE	15 - 40	ÓLEO SOLÚVEL
LATÃO	35 - 80	SECO, OU ÓLEO SOLÚVEL
BRONZE	15 - 35	SECO, OU ÓLEO SOLÚVEL
ALUMÍNIO	60 - 80	SECO, OU ÓLEO SOLÚVEL

Avanço (VF) (mm/mín.)		Minimo	Maximo
Diâmetros (mm)			
2,50 à 2,90		0,015	0,03
3,00 à 4,90		0,02	0,05
5,00 à 7,90		0,03	0,07
8,00 à 10,90		0,07	0,18
11,00 à 20,00		0,08	0,18

Os Avanços são recomendações, deve-se alterar de acordo com o material a furar.