

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**JAIRO NUNES DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE E TIPOS DE  
REVESTIMENTOS NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR  
FE 45012**

**JARAGUÁ DO SUL, MARÇO DE 2016.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**JAIRO NUNES DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE E TIPOS DE  
REVESTIMENTOS NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR  
FE 45012**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado como requisito para obtenção do título de tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, do Campus Jaraguá do Sul – Geraldo Werninghaus, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Professor Orientador: Fernando H. Gruber Colaço, Me.

**JARAGUÁ DO SUL, MARÇO DE 2016.**

S237a Santos, Jairo Nunes dos

Avaliação dos parâmetros de corte e tipos de revestimentos na furação de ferro fundido nodular FE45012 / Jairo Nunes dos Santos ; orientador Fernando H. Gruber Colaço. – Jaraguá do Sul, SC, 2016.

69 f.

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

Inclui bibliografia

1. Ferro fundido. 2. Parâmetros de corte. 3. Usinagem. I. Colaço, Fernando H. Gruber. 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 DOS PARÂMETROS DE CORTE E TIPOS DE  
REVESTIMENTOS NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR  
FE 45012**

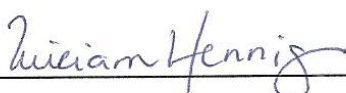
**JAIRO NUNES DOS SANTOS**

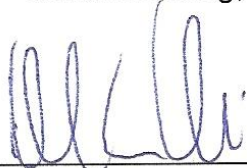
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 31 de março de 2016.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Fernando H. Gruber Colaço, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Miriam Hennig, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Delcio Luís Demarchi, Me.

  
\_\_\_\_\_  
Gabriel Costa Sousa, Me.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer a Deus pela oportunidade de concluir esse curso, dando saúde, sabedoria e me auxiliando em todos os momentos dessa jornada, obrigado senhor.

Também agradeço a minha esposa que me auxiliou, compreendendo, dando forças e me incentivando nesse período em que estive envolvido nesse curso, você é muito especial para mim.

Ao meu orientador e amigo, Professor Fernando H. Gruber Colaço, que me auxiliou nesse trabalho, agradeço pelos seus ensinamentos, compreensão e dedicação e sua orientação nesse trabalho.

Agradeço a Professora Miriam Henning pela sua cooperação nesse trabalho e sua atenção, o que contribui para a grandeza desse estudo, agradeço a todos professores que diretamente e indiretamente estiveram envolvidos nesse trabalho.

Também agradeço por esse período que estive nessa instituição (IFSC), a todos professores que compõem o quadro dela, aos colegas de classe, e a todos meus amigos por compartilhar essa minha alegria.

“Portanto dele, por Ele e para  
Ele são todas as coisas.  
A Ele seja a glória perpetuamente!  
Amém. “Citação bíblica

## RESUMO

Nesse trabalho foram realizados estudos sobre a influência dos parâmetros de corte e revestimentos de brocas na furação do ferro fundido nodular classe FE45012. Além disso, o tempo de vida das ferramentas foi verificado através da variação da corrente do motor e perda de massa das brocas ensaiadas. Utilizaram-se brocas de aço rápido com diâmetro de 12 mm sem revestimento, brocas com tratamento termoquímico de boretação sólida e com revestimento comercial de TiN. Os ensaios de furação foram realizados com velocidade de corte de 35 m/min e 20 m/min, os avanços utilizados foram de 0,2 mm/rev. e 0,1 mm/rev.. Utilizaram-se como substratos para furação, barras de ferro fundido FE45012 com dimensões aproximadas de 60 mm de espessura, 510 mm de comprimento e 200 mm de largura. O programa CNC foi realizado de forma a aproveitar grande parte da superfície do substrato. Já a profundidade de furação foi de três vezes o diâmetro da broca sem interrupção de furação, ou seja, furação contínua. As furações foram realizadas sem lubrificação e refrigeração. Os desgastes nas brocas foram analisados por perda ou ganho de massa e por análise de imagem. Para analisar as brocas antes e após os ensaios de furação foi utilizado um microscópio. Os resultados mostraram que o aumento da velocidade de corte foi determinante na redução de vida da ferramenta e o revestimento influenciou positivamente na resistência da broca de aço rápido. A medição da corrente elétrica do equipamento nos ensaios de furação não mostrou eficiência para prever o tempo de troca da ferramenta antes do colapso. Para a quantidade de furos realizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ferro Fundido Nodular. Furação. Desgaste. Parâmetros de Corte.

## ABSTRACT

In this work, we studied the influence of cutting parameters and drill casings in the drilling of nodular cast iron FE45012 class. Furthermore, the lifetime of the tools has been verified by the motor current variation and weight loss of the tested bits. Were used HSS drills of 12 mm diameter without covering, drills thermochemical treatment of solid boriding and commercial TiN coating. The drilling tests were performed with cutting speed 35 m / min and 20 m / min, advances used were 0.2 mm / rev to 0.1 mm / rev. They were used as substrates for drilling, FE45012 iron bars with dimensions of approximately 60 mm thick, 510 mm long and 200 mm wide. The CNC program was performed in order to take advantage of much of the substrate surface. Since the drilling depth was three times the diameter of the drill hole without interruption, ie continuously drilling. The drillings were performed without lubrication and cooling. The wear on drills were analyzed for loss or gain mass and image analysis. To analyze the drills before and after drilling tests we used a microscope. The results showed that increased cutting speed was instrumental in reducing tool life and coating positively influence the strength of high-speed steel drill. The measurement of the electric current of the equipment in the drilling tests showed efficiency to predict the tool change time before the collapse. For the amount of drilled holes.

**KEYWORDS:** Nodular Cast Iron. Drilling. Wear. Cutting parameters.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1- Microestrutura do ferro fundido nodular.....  | 20 |
| FIGURA 2 – Movimentos principais de corte.....  | 22 |
| FIGURA 3 – Principais ângulos em brocas helicoidais.....  | 24 |
| FIGURA 4 - Influência da cobertura na vida da broca de aço rápido.....                                      | 28 |
| FIGURA 5 – Espessura da camada de Boro no aço AISI M2 em função do tempo de boretação.....                  | 29 |
| FIGURA 6 – Forças atuantes na ferramenta de corte.....  | 32 |
| FIGURA 7 - Principais causas de desgastes na ferramenta.....  | 33 |
| FIGURA 8 – Desgaste de flanco.....  | 34 |
| FIGURA 9 – Desgaste nas guias das ferramentas.....  | 35 |
| FIGURA 10 – Desgaste de cratera em brocas.....  | 35 |
| FIGURA 11 - Lascamento da aresta principal da broca.....  | 36 |
| FIGURA 12 - Desgaste na ponta da broca.....   | 36 |
| FIGURA 13 - Paquímetro (A), micrometro externo (B), goniômetro (C).....                                     | 37 |
| FIGURA 14 – Aresta principal de uma broca analisada por meio de imagem.....                                 | 38 |
| FIGURA 15 - Influência do tempo de usinagem na corrente, com brocas revestidas de TiN e não revestidas..... | 39 |
| FIGURA 16 – Influência do tempo de usinagem no desgaste, com brocas revestidas e não revestidas.....        | 40 |
| FIGURA 17 - Tipos de indentadores utilizados para medir a dureza a) Brinell, b) Rockwell e c) Vickers.....  | 40 |
| FIGURA 18 - Corpo de prova faceado.....   | 42 |
| FIGURA 19 - Brocas utilizadas nos ensaios, HSS, com revestimento de TiN e de Boro.....                      | 43 |
| FIGURA 20 - Centro de usinagem vertical CNC ROMI D600.....  | 43 |
| FIGURA 21 - Balança analítica AUX 220.....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 22 - Microscópio estereoscópio Stemi 2000-C .....  | 44 |
| FIGURA 23 – Analisador de qualidade de energia trifásica Fluke Série 430 .....                        | 45 |
| FIGURA 24 - Microdurômetro modelo FM-800 .....  | 45 |
| FIGURA 25 – Broca com camada de Boro .....  | 46 |
| FIGURA 26 – Furações no corpo de prova .....  | 47 |
| FIGURA 27 – Equipamento utilizado para medição da corrente .....                                      | 48 |
| FIGURA 28 - Variação da corrente.....   | 49 |
| FIGURA 29 - Posições em que as brocas helicoidais foram fotografadas.....                             | 50 |
| FIGURA 30 – Tela do microdurômetro mostrando os resultados dos ensaios .....                          | 51 |
| FIGURA 31 – Amostra de broca embutida.....  | 51 |
| FIGURA 32 – Efeito do avanço no desgaste das brocas de aço rápido para os 3 tipos de superfície ..... | 53 |
| FIGURA 33 – Desgaste das arestas de corte das brocas usinadas com os parâmetros a) H.B1 b) H.B2.....  | 54 |
| FIGURA 34 - Desgaste ocasionado na condição H.B1 .....  | 55 |
| FIGURA 35 – Broca sem revestimento com acúmulo de material na ponta .....                             | 55 |
| FIGURA 36 – Valores de corrente do motor para as condições H.A1 e H.A2 .....                          | 56 |
| FIGURA 37 – Aumento gradativo da corrente.....  | 57 |
| FIGURA 38 – Efeitos provocados pelo avanço de corte nos 3 tipos de materiais .....                    | 57 |
| FIGURA 39 – Efeito da velocidade de corte no desgaste das brocas .....                                | 58 |
| FIGURA 40 – Efeito do tipo de superfície no desgaste das brocas .....                                 | 59 |
| FIGURA 41 – Acúmulo de material na broca para a condição H.B2 .....                                   | 60 |
| FIGURA 42 – Camadas excessivas nas laterais das brocas boretadas .....                                | 61 |
| FIGURA 43 – Especificações da furação no acompanhamento da corrente do motor .....                    | 62 |
| FIGURA 44 - Microdureza das brocas.....   | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 – Microestrutura do ferro fundido nodular.....                      | 20 |
| TABELA 2 - Propriedades mecânicas do FE 45012 dentro de várias normas .....  | 21 |
| TABELA 3 – Característica, composição e classificação dos aços rápidos ..... | 26 |
| TABELA 4 – Avanço recomendado para ferro fundido .....                       | 30 |
| TABELA 5 - Momento torçor e força de avanço e no processo de usinagem .....  | 32 |
| TABELA 6 – Composição química do ferro fundido nodular FE 45012 .....        | 41 |
| TABELA 7 - Matriz de planejamento .....                                      | 48 |
| TABELA 8 - Desgaste medido através da variação de massa das brocas .....     | 52 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |  |
|------------------|--|
| ABNT             | - Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| AISI             | - American Iron and Steel                    |
| ASTM             | - American Society for Testing and Materials |
| B <sub>4</sub> C | - Carboneto de Boro                          |
| DIN              | - Deutsches Institut für Normung             |
| FE               | - Ferro Fundido Nodular (Esferoidal)         |
| F <sub>p</sub>   | - Força passiva                              |
| F <sub>z</sub>   | - Força de avanço                            |
| HB               | - Dureza Brinell                             |
| HRC              | - Dureza Rockwell C                          |
| HV               | - Dureza Vickers                             |
| Mo               | - Molibdênio                                 |
| Mpa              | - Mega Pascal                                |
| M <sub>z</sub>   | - Torque                                     |
| rot              | - Rotação                                    |
| SAE              | - Society of Automotive Engineers            |
| TiAlN            | - Nitreto de titânio alumínio                |
| TiCN             | - Carbonitreto de Titânio                    |
| TIV              | - Throug Indenter Viewing                    |
| UCI              | - Ultrasonic Contact Impedance               |
| V                | - Volts                                      |
| μ                | - Micron                                     |

# SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>15</b> |
| 1.1 PROBLEMA .....  | 17        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....   | 17        |
| 1.3 OBJETIVOS .....   | 17        |
| <b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>1.3.2 Objetivos específicos .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>19</b> |
| 2.1 FERRO FUNDIDO .....   | 19        |
| <b>2.1.1 Ferro fundido nodular.....</b>   | <b>19</b> |
| <b>2.1.2 Características e propriedades do ferro fundido nodular Fe 45012 .</b> | <b>21</b> |
| 2.2 FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS .....  | 22        |
| <b>2.2.1 Brocas empregadas na furação do ferro fundido.....</b>                 | <b>23</b> |
| <b>2.2.2 Brocas de aço rápido (HSS).....</b>                                    | <b>25</b> |
| 2.3 REVESTIMENOS EM BROCAS.....   | 27        |
| <b>2.3.1 Aços rápidos com cobertura de TiN.....</b>                             | <b>27</b> |
| <b>2.3.2 Aço rápido com revestimento de Boro.....</b>                           | <b>29</b> |
| 2.4 PARÂMETROS DE FURAÇÃO.....  | 30        |
| 2.5 FORÇAS DE CORTE NA FURAÇÃO.....   | 31        |
| 2.6 DESGASTES DA FERRAMENTA.....  | 33        |
| 2.7 TIPOS DE DESGASTE .....   | 34        |
| <b>2.7.1 Desgaste de flanco (VB).....</b>                                       | <b>34</b> |
| <b>2.7.2 Desgaste das guias (H) .....</b>                                       | <b>34</b> |
| <b>2.7.3 Desgaste de cratera (k) .....</b>                                      | <b>35</b> |
| <b>2.7.4 Lascamento dos gumes.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>2.7.5 Desgaste do gume transversal .....</b>                                 | <b>36</b> |
| 2.8 AVALIAÇÃO DE DESGATES DE BROCAS.....  | 37        |
| <b>2.8.1 Medição direta .....</b>   | <b>37</b> |
| <b>2.8.2 Microscópio e análise de imagens.....</b>                              | <b>38</b> |
| <b>2.8.3 Balança de precisão .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>2.8.4 Medição da corrente elétrica .....</b>                                 | <b>39</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.8.5 Ensaio de Dureza.....                                       | 40        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                 | <b>41</b> |
| 3.1 MATERIAIS .....   | 41        |
| 3.2 EQUIPAMENTOS .....  | 43        |
| 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....                                | 46        |
| 3.3.1 Realização do revestimento de Boro .....                    | 46        |
| 3.3.2 Realização dos ensaios de furação.....                      | 46        |
| 3.3.3 Análise da corrente do motor .....                          | 48        |
| 3.3.4 Análise da variação de massa das brocas .....               | 49        |
| 3.3.5 Análise por imagens .....                                   | 49        |
| 3.3.6 Análises de microdureza .....                               | 50        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                             | <b>52</b> |
| 4.1 AVALIAÇÃO POR VARIAÇÃO DE MASSA.....                          | 52        |
| 4.2 EFEITO DO AVANÇO DE CORTE .....                               | 53        |
| 4.3 EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE.....                            | 58        |
| 4.4 EFEITO DO TIPO DE REVESTIMENTO NO DESGASTE DAS BROCAS.....    | 59        |
| 4.5 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DAS BROCAS PELA CORRENTE DO MOTOR ..... | 61        |
| 4.6 DUREZA DAS BROCAS .....                                       | 62        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                               | <b>64</b> |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                        | 64        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>66</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de furação é uma das operações mais utilizadas na usinagem, pois a grande maioria de peças fabricadas na indústria são dotadas de, pelo menos, um furo, com exceção das peças fundidas ou forjadas. A furação tem como objetivo abrir, alargar ou gerar acabamento em furos de peças, para realizar essas operações são utilizadas ferramentas multicortantes conhecidas como brocas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As brocas são fixadas em máquinas ferramentas, com isso utiliza-se a combinação de movimentos de avanço e rotação da broca ou peça, gerando altas temperaturas no local do corte, causado pelo atrito entre a broca e a peça. Essa combinação faz com que as brocas se danifiquem gradativamente, ocasionando perdas na produção para troca de ferramentas ou reafiação das mesmas (MACHADO et al., 2009).

Segundo Barbosa (2009), na indústria a procura por novos materiais está relacionada com o custo e a eficiência, no esforço de se ter materiais com características similares, têm se empregado pesquisas e testes para verificar quais os melhores parâmetros de corte, tempo de paradas, ferramentas com mesma resistência e com boa usinabilidade.

O ferro fundido tem sido muito utilizado nas indústrias, dentre esta classe, o nodular atende a muitas das aplicações dos aços e com redução da massa em 10%. Dessa família, o mais aplicado industrialmente é o ABNT FE45012. O motivo de grande aceitação na indústria é que esse tipo de material oferece vantagens que não são encontradas em outros ferros fundidos, tais como: resistência elevada ao desgaste, resistência à fadiga, ductilidade, tenacidade, boa usabilidade e a sua similaridade com os aços SAE 1020 e SAE 1030 (PAULA, 2013).

Sua empregabilidade na indústria manufatureira é principalmente a utilização em carcaças de máquinas e no segmento automobilístico como blocos de motor, além de outros equipamentos (FRANCKLIN, 2009).

Outro fator importante a ser observado na usinagem com brocas é o desgaste das ferramentas de corte, pois além de dificultar a produção contínua,

também traz grandes prejuízos à indústria. A degradação das ferramentas pode ser definida como a destruição de uma ou de ambas as superfícies de corte, envolvendo perda progressiva de material, sendo assim torna-se de vital importância os estudos sobre a formação dos mecanismos e dos tipos de desgastes que ocorrem na broca (BARBOSA, 2009).

Atualmente para diminuir o efeito da baixa produtividade de certas ferramentas, como as brocas, estão sendo desenvolvidas pesquisas e análises, para reduzir o desgaste e elevar a vida útil das mesmas. Nota-se que o mercado vem ofertando ferramentas com revestimento na sua superfície, o que pode elevar os parâmetros de corte, melhorando a produtividade. Um dos avanços significativos nessas ferramentas é o aumento da utilização de brocas de aço rápido com revestimento de Nitreto de Titânio e Nitreto de Titânio-Alumínio (TiN, TiAlN) e outros que estão sendo objetivos de análise como as brocas boretadas (FORTUNATO, 2012).

Para ter uma boa usinagem nas ferramentas de corte, é preciso que se verifique quais os parâmetros recomendados, pois estes influenciam diretamente na vida útil das brocas. Nesse trabalho serão estudados os mecanismos de desgaste nas ferramentas variando as condições de usinagem, verificando-se há perda ou ganho de massa pelo desgaste ou adesão de material na ponta da broca.

Para uma definição clara e confiável do desempenho das brocas, foi utilizado um dispositivo para medir a corrente do motor, equipamento esse que mede praticamente todos os parâmetros do sistema de energia: tensão, corrente, potência, consumo de energia, desequilíbrio e oscilações. A partir dessas informações, desenvolveu-se um estudo a fim de auxiliar a escolha dos melhores parâmetros utilizados.

Na atualidade, existem critérios para avaliar o momento ideal da substituição ou reafiação das ferramentas, mas muitas vezes essas especificações são ignoradas, ocasionando a troca prematura ou tardia das ferramentas.



## 1.1 PROBLEMA

A furação é um dos processos mais utilizados na indústria manufatureira. Nesse sentido, surge a questão de pesquisa: como desenvolver um processo de boa qualidade em furação a fim de reduzir custos operacionais, considerando a escolha de ferramentas na furação de ferro fundido nodular e os parâmetros de usinagem com melhor desempenho nos vários revestimentos?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em meio aos processos de usinagem, a furação é uma das operações mais utilizadas e ocupa aproximadamente 30% daqueles processos. A broca é a ferramenta fabricada em maior quantidade e também a mais difundida em todo o mundo.

Na indústria mecânica e outros setores, nos quais acontece o manuseio e a fabricação de máquinas, tais como carcaças metálicas e outros equipamentos, nota-se uma tendência para o uso de materiais em ferro fundido nodular na sua fabricação. Com objetivo de avaliar o processo de furação nesses materiais, torna-se fundamental verificar as principais influências no processo de usinagem, como a variação de velocidade de corte e avanço, os revestimentos de materiais nas brocas e os principais desgastes que afetam sua vida útil na usinagem.

Para tal, justifica-se o estudo detalhado e uma avaliação dos parâmetros que contribuem na usinagem. Com uma análise mais aprofundada do processo de furação, é possível definir a melhor ferramenta e qual revestimento pode contribuir no prolongamento de sua vida útil, afim de reduzir custos e melhorar a qualidade dos processos.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Verificar a influência dos parâmetros de corte e revestimentos na furação do ferro fundido nodular FE 45012

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Analisar o efeito dos tipos de revestimento no desgaste e na dureza das brocas;
- Analisar o efeito por velocidade de corte e do avanço no desgaste das brocas;
- Verificar a eficiência da medição da corrente no equipamento na previsão de troca da ferramenta;
- Verificar a eficiência da medição por imagem e variação da massa no desgaste das ferramentas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FERRO FUNDIDO

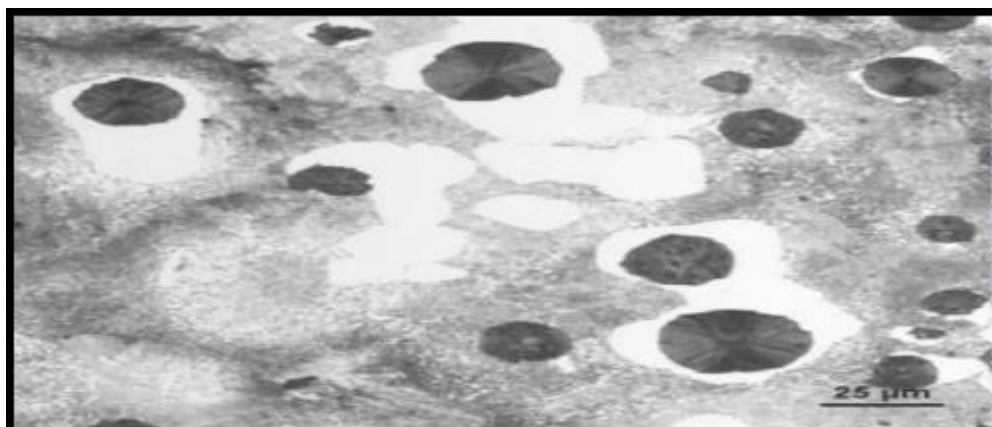
Os ferros fundidos pertencem à classe de ligas ferrosas que contém teores de carbono acima de 2%, conhecidos como liga ternária por ser composto de três elementos: Ferro, Carbono (2 a 4.5%) e Silício (1 a 3%). Hoje os Ferros Fundidos são classificados em diferentes famílias principalmente conforme a sua grafita. Para produzir esses tipos de materiais, depende-se da quantidade de cada elemento. Como o material é resfriado ou como ele é tratado termicamente, podem ser classificados como: Ferro Fundido Cinzento, Nodular, Maleável, Vermicular, Branco (GUESSER, 2009).

Segundo Francklin (2009) os Ferros Fundidos podem apresentar grafita sob a forma compacta, ou de veios ou nódulos, dependendo das influências de sua composição química, nos quais é possível avaliar os efeitos nas suas propriedades termomecânicas, como dureza e ductilidade.

#### 2.1.1 Ferro fundido nodular

Os Ferros Fundidos Nodulares apresentam grafitas em forma de nódulos, conferindo maior ductilidade, como pode ser visto na Figura 1. Os Nodulares Ferríticos apresentam valores de resistência de 380 a 450 Mpa, e alongamento entre 10-22%. Esses dados e suas combinações de propriedades têm feito com que a família dos FoFo Nodulares ocupe aplicação crescente na engenharia devido a sua notável tenacidade, resistência mecânica e ductilidade, semelhante aos aços-carbono que não contêm elementos de liga, substituindo então o Ferro Fundido Cinzento, maleável, aço fundido e forjado, e estruturas soldadas (GUESSER, 2009; FERRARESI, 1977).

FIGURA 1- Microestrutura do ferro fundido nodular



Fonte: Guesser (2009, p. 6)

A norma NBR 6916(1981) cita que quando os ferros fundidos são classificados conforme a grafita, se a mesma apresenta forma de nódulos, esse é chamado de nodular ou esferoidal, classificado como FE. A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas de alguns tipos de Ferros Fundidos Nodulares, no estado bruto de fusão.

TABELA 1 – Microestrutura do ferro fundido nodular

| Classe      | Limite de Resistência (LR) (Mpa) | Limite de escoamento (LE) (Mpa) | Alongamento (% A) | Dureza Brinell (HB) | Microestrutura Predominante |
|-------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| FE 38012    | 380                              | 240                             | 17,0              | 140 - 180           | Ferriítica                  |
| FE 42012    | 420                              | 280                             | 12,0              | 150 - 200           | Ferriítica - Perliítica     |
| FE 50007    | 500                              | 350                             | 7,0               | 170 - 240           | Ferriítica - Perliítica     |
| FE 60003    | 600                              | 400                             | 3,0               | 210 - 280           | Perliítica                  |
| FE 70002    | 700                              | 450                             | 2,0               | 230 - 300           | Perliítica                  |
| FE 80002    | 800                              | 550                             | 2,0               | 240 - 312           | Perliítica                  |
| FE 38017-RI | 380                              | 240                             | 17,0              | 140 - 180           | Ferriítica                  |

Fonte: Adaptado Guesser (2009, p. 52)

Francklin (2009) ressalta que o ferro fundido esferoidal ou nodular é considerado um grande avanço da tecnologia na metalurgia dos fundidos. Conhecido mundialmente como ferro fundido nodular, no cenário atual, está sendo muito utilizado

na indústria automobilística na substituição do aço. Vários testes comprovaram que este material não é difícil para ser fundido, é mais econômico, e após virar sucata ainda pode ser reciclado.

### 2.1.2 Características e propriedades do ferro fundido nodular Fe 45012

Para o Ferros Fundidos Nodular FE 45012, de acordo com as normas apresentadas na Tabela 2, define que esse tipo de material possui limite de resistência à tração de 450 Mpa e pode variar de 12% a 22% o alongamento desse material e uma dureza de 131-217(HB). Segundo Paula (2013), essas propriedades conferem-lhe boa usinabilidade, devido ao fato de ser um ferro dúctil, não contendo grande quantidade de perlita.

TABELA 2 - Propriedades mecânicas do FE 45012 dentro de várias normas

| PROPRIEDADES MECANICAS |                     |                       |          |
|------------------------|---------------------|-----------------------|----------|
|                        |                     | Ferro Fundido Nodular |          |
| Normas                 | Tupy                | FE 45012              | FE 55006 |
|                        | ABNT NBR 6589       |                       |          |
|                        | ABNT NBR 6916       | FE 42012              | FE 50007 |
|                        | ASTM A 48           |                       |          |
|                        | ASTM A 536          | 65-45-12              | 80-55-06 |
| Estrutura              | F= ferrita P=perita | F+P                   | P+F      |
|                        | Tração (Mpa)        | 450                   | 550      |
| Propriedades Mecânicas | Alongamento %       | 12                    | 6        |

Fonte: Adaptado Tupy S.A (2015, p. 47)

O FE 45012 é classificado como grafita I e II, em uma matriz totalmente ferrítica/perlítica, apresentando grafita em forma de nódulos. A obtenção da grafita nodular (esférica) é consequente da adição de determinados elementos químicos ou condições particulares de fabricação, que modificam sua forma de crescimento. Esse tipo de material é recomendado para peças que requeiram elevadas propriedades mecânicas, alta tenacidade e ótima estanqueidade (BARBOSA, 2009).

Um fator de grande relevância no FE 45012, são suas principais características de boa usinabilidade, bom acabamento superficial e aplicações

diversas, como: fabricação de discos e tambores para freio de automóveis, componentes para bombas de pressão e componentes para a estrutura de motores elétricos, devido a sua eficácia de amortecimento e propriedades mecânicas (resistência, tenacidade e ductilidade) (FRANCKLIN, 2009).

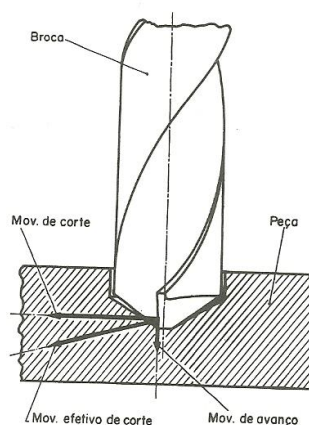
Barbosa (2009) explica que dos 25% em tempo de usinagem dos processos convencionais usados, pela indústria de manufatura, 33% estão correlacionados com o procedimento de furação, o que o torna determinante no setor de usinagem.

## 2.2 FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS

O processo de furação é um processo de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida e é constantemente utilizado na produção industrial. Apesar de existirem similaridade entre o processo de furação e o processo de torneamento, a furação possui algumas particularidades (MACHADO et al.,2009).

Segundo Ferraresi (1977), a furação é um método de usinagem eficiente e econômico destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça, com auxílio de uma ferramenta multicortante com movimento de corte circular. Para tanto, a ferramenta ou a peça se movimentam segundo um curso retilíneo, simultâneo ou paralelo ao eixo principal da máquina. O processo de furação e seus principais movimentos de corte podem ser observados na Figura 2.

FIGURA 2 – Movimentos principais de corte



Adaptado: Ferraresi (1977, p.2)

Paula (2013) e Barbosa (2009) citam em seus trabalhos que os ferros fundidos nodulares apresentam boas características no processo de furação e usinagem devido a sua microestrutura, pois apresentam menor região de perlita e a grafita está na forma de nódulo, onde acontecem poucos pontos de deformação, além de garantir um maior tempo de aproveitamento das ferramentas, se combinado com os parâmetros corretos.

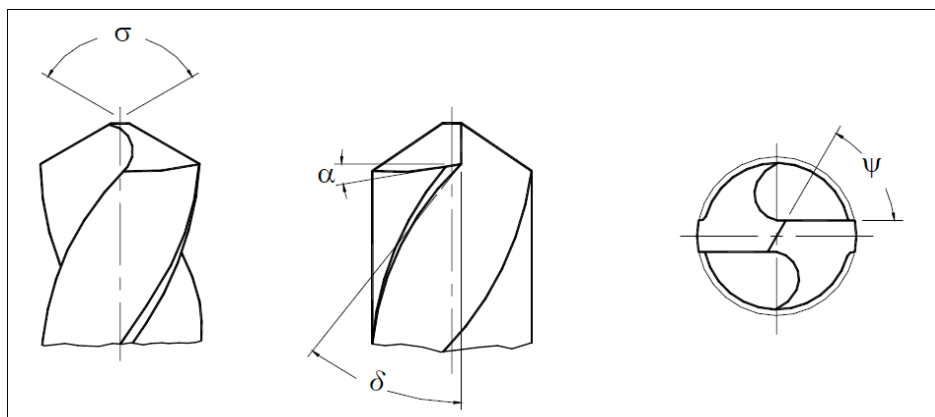
### **2.2.1 Brocas empregadas na furação do ferro fundido**

No processo de furação os tipos de brocas geralmente utilizados são helicoidais, escalonadas, chatas, de centro, helicoidais com pastilhas de metal-duro de insertos reversíveis, brocas ocas, entre outras. As brocas são as ferramentas mais utilizadas nos processos de usinagem na realização de furos. Na indústria manufatureira, boa parte das operações de furação é realizada com brocas helicoidais de aço rápido com ou sem camada de cobertura, com isso o processo de furação torna-se extremamente lento no processo convencional (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) para uma padronização na produção e evitar a confecção desenfreada de brocas com geometrias e dimensões aleatórias, os fabricantes seguem a norma NBR 6176 (1977) a qual define todas as especificações com as quais as brocas devem ser confeccionadas.

A geometria das brocas helicoidais tem exercido forte influência no desempenho, levando em conta vários fatores tais como: profundidade, diâmetro do furo, volume de produção, tolerâncias de formas e de medidas. Com isso torna-se indispensável a observação dos ângulos para ter um bom desempenho, pois eles evitam vibrações e quebra de pontas. Os principais ângulos são: Ângulo de ponta ( $\sigma$ ), Ângulo de incidência ( $\alpha$ ), Ângulo de hélice ( $\delta$ ), Ângulo do gume transversal ( $\psi$ ), como mostra a Figura 3 (STEMMER, 2005).

FIGURA 3 – Principais ângulos em brocas helicoidais



Fonte: Stemmer (1992, apud MOCELLIN, 2002, p.12)

Machado (2009) conclui nos ensaios realizados que o desempenho das brocas está relacionado com a geometria empregada e sua afiação. Os melhores resultados foram evidenciados quando se conseguiu dissipar o calor. Já com o aumento da área de contato do cavaco-ferramenta, percebeu-se que no fim da vida das brocas os furos apresentaram desvios de circularidade.

Na atualidade, os materiais mais importantes na fabricação das ferramentas são o metal duro e o aço rápido. A presença de novos materiais está se destacando consideravelmente no processo de furação, por garantir rigidez, potência e rotação ao processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As propriedades fundamentais que esses materiais devem apresentar são dureza e resistência ao desgaste. Entretanto, para certas aplicações, a tenacidade torna-se uma qualidade necessária (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Machado et al. (2009), as principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência a compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;



- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente.

O aço rápido e metal duro encontram um vasto campo de aplicação nas empresas manufatureiras, onde se tem feito grandes investimentos para obter uma melhoria das condições desses materiais, através, principalmente da aplicação de uma cobertura de materiais mais resistente ao desgaste, como o Nitreto de Titânio (*TiN*), o Carbonitreto de Titânio (*TiCN*), o Nitreto de Titânio-Alumínio (*TiAlN*) e o Carboneto de Boro ( $B_4C$ ) (CHIAVERINI, 1986).

### **2.2.2 Brocas de aço rápido (HSS)**

A fabricação das ferramentas de aço rápido é composta de molibdênio, vanádio, tungstênio, cromo, nióbio e cobalto. Tais componentes oferecem tenacidade de alta rigidez a quente e de grande resistência ao desgaste. No estado, temperado sua estrutura é composta por complexos carbonetos em matriz martensítica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Os tipos mais utilizados de aços rápidos no mercado contêm em sua composição cromo e vanádio. Segundo a AISI e SAE, os aços-rápidos são classificados em duas categorias: os dominantes ao molibdênio apontado pela letra “M” e ao tungstênio pela letra “T”. Essas classes de aço rápido contam ainda com uma subdivisão em duas subclasses, contendo ambas cobalto: os tipos W-Co e Mo-Co. A Tabela 3 mostra as características, a composição e a classificação dos aços rápidos (CASTILLO, 2005).

TABELA 3 – Característica, composição e classificação dos aços rápidos

| Tipo de aço | Classificação SAE | %C   | %Mn | %Si  | %Cr | %V   | %W  | %Mo | %Co | Tenacidade | Resistência ao desgaste | Dureza a quente |
|-------------|-------------------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------------|-------------------------|-----------------|
| ao W        | T1                | 0,7  | 0,3 | 0,25 | 4   | 1    | 18  | -   | -   | Baixa      | Muito Boa               | Muito Boa       |
|             | T2                | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 18  | -   | -   |            |                         |                 |
|             | T3                | 1    | 0,3 | 0,25 | 4   | 3    | 18  | -   | -   |            |                         |                 |
|             | T7                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 14  | -   | -   |            |                         |                 |
|             | T9                | 1,2  | 0,3 | 0,25 | 4   | 4    | 18  | -   | -   |            |                         |                 |
| ao W-Co     | T4                | 0,75 | 0,3 | 0,25 | 4   | 1    | 18  | -   | 5   | Baixa      | Muito Boa               | Excelente       |
|             | T5                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 18  | -   | 8   |            |                         |                 |
|             | T6                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 1,5  | 20  | -   | 12  |            |                         |                 |
|             | T8                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 14  | -   | 5   |            |                         |                 |
| ao Mo       | M1                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 1    | 1,5 | 8   | -   | Baixa      | Muito Boa               | Muito Boa       |
|             | M2                | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 6   | 5   | -   |            |                         |                 |
|             | M3                | 1    | 0,3 | 0,25 | 4   | 2,75 | 6   | 5   | -   |            |                         |                 |
|             | M4                | 1,3  | 0,3 | 0,25 | 4   | 4    | 5,5 | 4,5 | -   |            |                         |                 |
|             | M10               | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | -   | 8   | -   |            |                         |                 |
| ao Mo-Co    | M6                | 0,8  | 0,3 | 0,25 | 4   | 1,5  | 4   | 5   | 13  | Baixa      | Muito Boa               | Excelente       |
|             | M30               | 0,85 | 0,3 | 0,2  | 4   | 1,25 | 2   | 8   | 5   |            |                         |                 |
|             | M34               | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 2   | 8   | 8   |            |                         |                 |
|             | M35               | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 6   | 5   | 5   |            |                         |                 |
|             | M36               | 0,85 | 0,3 | 0,25 | 4   | 2    | 6   | 5   | 8   |            |                         |                 |

Fonte: Chiaverini (1981, apud DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013, p.79)

Segundo Ferraresi (1977) os principais elementos de liga dos aços rápidos são:

- Carbono;
- Tungstênio e Mobilidêmio;
- Vanádio e nióbio;
- Cromo;
- Cobalto.

Os aços rápidos podem ser aplicados para usinagem de todos os tipos de materiais: Contudo, nenhum tipo de aço satisfaz completamente a todas as exigências de uma ferramenta. A rigor, os tipos M1, M2, M7, M10, T1 e T2 são os que apresentam melhor tenacidade, boa eficiência de corte, são mais fáceis de produzir e, assim, têm custo mais baixo (FERRARESI, 1977).

## 2.3 REVESTIMENTOS EM BROCAS

Vários fatores devem ser observados na escolha do material da ferramenta devido a condições severas de trabalho, tais como: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, formas e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e condições da operação (MACHADO et al., 2009).

O uso de revestimento nas brocas tem apresentado importantes resultados, devido ao aumento de rendimento e diminuição de desgaste, em razão das características que esses revestimentos possuem como: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química, aumentando assim a produtividade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

### 2.3.1 Aços rápidos com cobertura de TiN

Visando melhores resultados, mais produtividade e um maior tempo de vida, tem-se desenvolvido revestimentos que garantem a qualidade da ferramenta, fazendo com que a furação ocorra com esforços menores e velocidades de cortes superiores, pois tais revestimentos possuem menos atrito, alta dureza e apresentam menores desgastes, sobretudo na área de folga da ferramenta. As ferramentas normalmente encontradas no mercado com revestimentos são: brocas, fresas, fresas caracol e segmentos de brochas de aço revestidos (MACHADO et al., 2009).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), essas ferramentas têm beneficiado particularmente o aço rápido, especialmente através de um revestimento com material mais resistente ao desgaste, como o Carbonitreto de Titânio (TiCN), o Nitreto de Titânio (TiN), o Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN), entre outros que vêm sendo pesquisados.

Tal camada de revestimento possui as seguintes características:

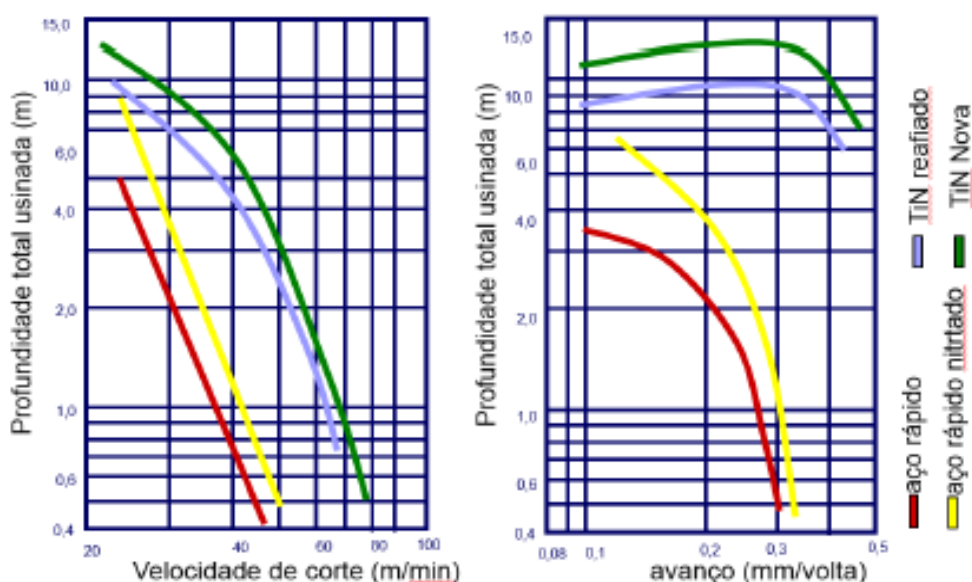
- Alta dureza, de 2300 a 3300 HV;
- Elevada ductibilidade;
- Redução sensível do caldeamento a frio (evita a formação da aresta

postiça de corte);

- Baixo coeficiente de atrito;
- Alta estabilidade química;
- Espessura de 1 a 4  $\mu\text{m}$ .

A Figura 4 mostra os resultados de Ferraresi (1977) com duas curvas de profundidade total usinada durante uma vida de brocas de aço rápido em relação a velocidade de corte e avanço, mostrando a melhoria que o revestimento de TiN provoca no desempenho da ferramenta.

FIGURA 4 - Influência da cobertura na vida da broca de aço rápido



Fonte: Rauscher (1990, apud DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013, p. 82)

Nos ensaios com brocas de Nitreto de Titânio, Marmentini (2009), conclui que a camada nitretada na ferramenta mostrou-se favorável, por diminuir a rugosidade  $R_a$  no corpo de prova avaliado, e também com a redução do atrito entre o material e a broca, durante a furação, diminuindo a força de corte, do avanço e as vibrações na broca, mostrando como resultado um excelente acabamento superficial dos furos.

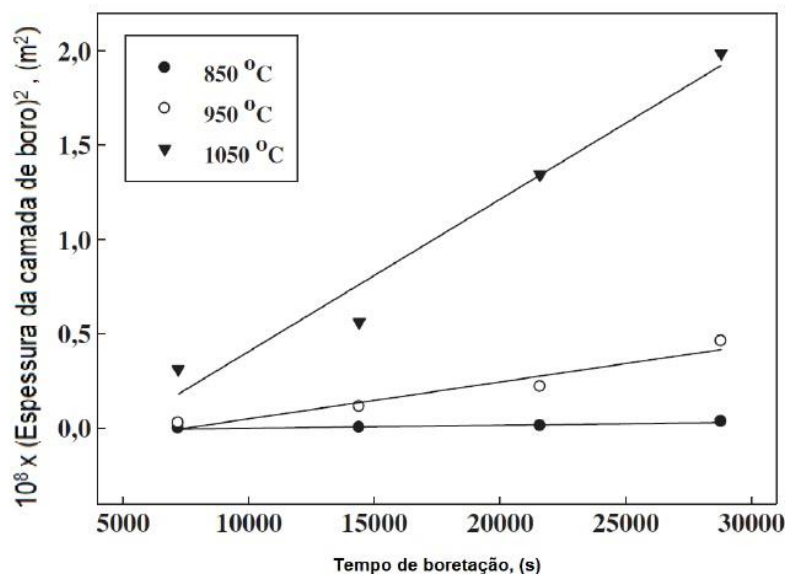
### 2.3.2 Aço rápido com revestimento de Boro

A boretação é um tratamento superficial relativamente pouco utilizado, consiste na difusão do elemento Boro; formando Boreto de Ferro com uma dureza muito elevada – 1.700 a 2000 HV. O processo é realizado em meio sólido constituído de um granulado composto de carboneto de Boro  $B_4C$  e de um ativador, o fluoreto duplo de boro e potássio. A temperatura do tratamento situa-se em torno de  $900^\circ C$  e o tempo depende da espessura desejada na camada boretada; por exemplo, para um aço comum com 0,45% de carbono, consegue-se, em 4 horas, uma camada com pouco mais de  $100\mu$  de espessura; em 12 horas, a espessura ultrapassa  $200\mu$  (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Ozbek e Bindal (2011) a boretação é um processo de endurecimento da superfície termoquímico nas quais átomos de boro são difundidos para dentro da superfície de uma peça de trabalho para formar boretos com os materiais de base. A boretação industrial pode ser aplicado à maioria dos materiais ferrosos, como aços estruturais, aços de baixa liga, aços ferramenta, aços inoxidáveis, aços fundidos, ferros fundidos e aço; materiais não ferrosos, como níquel, cobalto, em titânio e ligas a base de molibdênio e material duro.

Nos ensaios de Ozbek e Bindal (2011) ficou notável que a espessura da camada de boreto varia linearmente com o tempo, como pode ser visto na Figura 5.

FIGURA 5 – Espessura da camada de Boro no aço AISI M2 em função do tempo de boretação



Fonte: Ozbek e Bindal (2011, p.396)

## 2.4 PARÂMETROS DE FURAÇÃO

É indispensável escolher corretamente os parâmetros de furação com o propósito de obter bons resultados na usinagem, caso contrário os parâmetros indevidos reduzirão em grande parte a vida útil das brocas, podendo até ocasionar a quebra das mesmas (MACHADO et al., 2009).

Segundo Stemmer (2005) antes de iniciar a furação algumas condições preliminares devem ser analisadas, como:

Campo de aplicação, onde se avalia o diâmetro e qual a profundidade de furação na peça, os diâmetros variam de 0,2 até 100 mm, a profundidade máxima usual é de 10 vezes o diâmetro, mas numa primeira operação recomenda-se furar no máximo 5 vezes o diâmetro da broca e então retirá-la para remoção de cavacos e refrigeração.

A velocidade de corte é sempre referida ao diâmetro da broca, como mostra a Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n_r}{1000} \quad (1)$$

Onde:

$V_c$  = velocidade de corte [m/min.];

$d$  = diâmetro da broca [mm];

$n_r$  = rotações da broca por minuto [rpm].

Os avanços variam conforme o tipo de material da peça e o diâmetro da broca. No caso do ferro fundido, recomenda-se broca tipo N, com ângulos de ponta de 118°. A Tabela 4 mostra o avanço recomendado e o tipo de material.

TABELA 4 – Avanço recomendado para ferro fundido

| d<br>[mm] | FºFº CINZENTO e FºFº<br>maleável | FºFº duro HB<br>≥ 240 |
|-----------|----------------------------------|-----------------------|
| até 15    | 1,5 a 3%                         | 1 a 2%                |
| 15 a 30   | 1 a 2,5%                         | 0,8 a 1,5%            |
| >30       | 1 a 2%                           | 0,5 a 1%              |

Fonte: Stemmer (2005, p.18)

Segundo Wosniak, Polli e Camargo (2009), a formação dos cavacos sofre grande influência dos parâmetros de corte e do revestimento da ferramenta. Em seu trabalho, foram evidenciados os efeitos da velocidade de corte, principalmente no tipo de cavaco, onde se percebeu que a combinação da velocidade de corte e avanço gera cavacos quebradiços. Os tipos de cavaco emaranhados podem ocasionar a quebra da ferramenta.

Avaliando o efeito da velocidade de corte, Marmentini, Pintaúde e Beltrão (2008), utilizaram em seus ensaios duas velocidades de 15 e 20m/min., que foram aplicadas em dois tipos de ferros fundidos. Com a elevação da velocidade de corte as ferramentas apresentaram maiores desgastes, pois o atrito entre a peça e a ferramenta causou o aumento da temperatura no local de corte, fazendo com que as ferramentas sofram adesão de material nas arestas de corte, alterando a circularidade da furação.

## 2.5 FORÇAS DE CORTE NA FURAÇÃO

A medição da força de corte presente no processo de usinagem é de grande importância na avaliação das condições de corte e no desenvolvimento de máquinas-ferramentas. Além disso, permitem também um melhor entendimento dos fenômenos de formação de cavaco e dos mecanismos de desgaste envolvidos no processo de usinagem (FERRARESI, 1977; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As forças que atuam sobre uma broca helicoidal durante o corte geram esforços de torção (devido à rotação da broca) e esforços de compressão (devido ao avanço da broca). Assim, podem-se estimar os esforços de corte no processo de furação, através do momento torçor e da força de avanço (FERRARESI, 1977).

Na Tabela 5, Diniz, Marcondes e Coppini (2013) mostram que para o estudo dos esforços deve se considerar as forças aplicadas nas arestas principais de corte, na aresta transversal e o atrito gerado entre as guias e parede do furo. Os valores apresentados mostram a parcela que cada elemento contribui no momento torçor e na força de avanço.

TABELA 5 - Momento torçor e força de avanço e no processo de usinagem

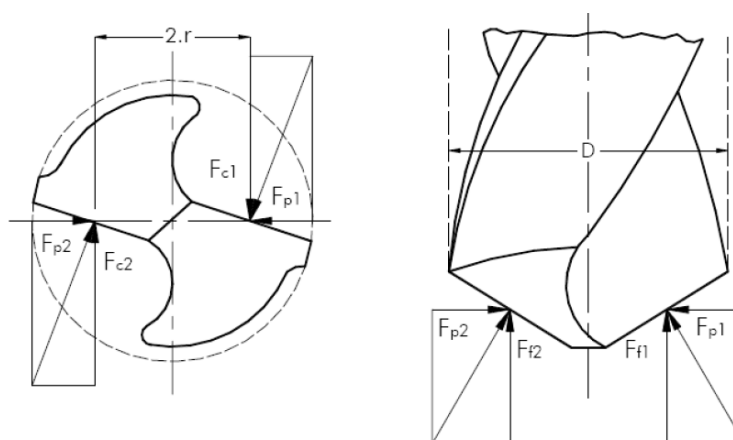
| ESFORÇOS        | Arestas Principais | Aresta Transversal | Atrito  |
|-----------------|--------------------|--------------------|---------|
| Momento Torçor  | 77 a 90 %          | 3 a 10%            | 3 a 13% |
| Força de Avanço | 39 a 59 %          | 40 a 58%           | 2 a 5 % |

Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.205)

Verifica-se na Tabela 5 a influência da aresta transversal de corte no valor da força de avanço. A baixa velocidade de corte e ângulo de saída e de folga negativo na região central da broca é responsável pelo esmagamento do cavaco nesta região e o encruamento do fundo do furo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Durante a furação no processo de usinagem com brocas helicoidais, atuam forças de avanço de corte, que podem ser divididas em três componentes: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ). A Figura 6 mostra a combinação das forças (STEMMER, 2005).

FIGURA 6 – Forças atuantes na ferramenta de corte



Fonte: König e Klocke (1997, apud FORTUNATO 2012, p.17)

Uma broca helicoidal durante o corte é basicamente submetida a esforços de torção (devido à rotação da broca) e a esforços de compressão (devido ao avanço da ferramenta).

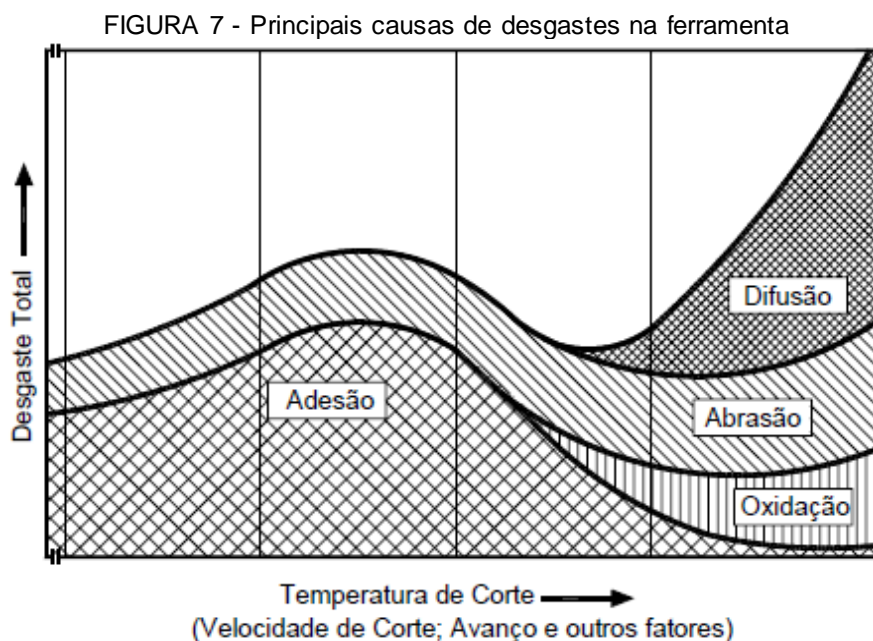
Em seus estudos, Silva (2010) verificou que as forças de usinagem  $F_t$  e o momento torçor ( $M_t$ ) mostraram-se mais frágeis em relação às várias paradas e quantidade de recuo das ferramentas. A vida útil e o torque  $M_t$  mostraram relação contrária, pois quando  $F_t$  e  $M_t$  são reduzidos, a vida da ferramenta é aumentada.



## 2.6 DESGASTES DA FERRAMENTA

O atrito entre a peça e a ferramenta de corte causam perda gradual de material no gume principal. Sabe-se que a força mecânica existente no processo de furação e o atrito ocorrido entre a ferramenta, a peça e o cavaco resultam em desgastes, deformando a geometria original da broca, alterando a qualidade superficial, causando aumento de força de corte e de ruídos, resultando na quebra da broca e na deformação da aresta de corte, levando ao fim de sua vida útil (MARMENTINI, 2009; CASTILLO, 2005).

Os mecanismos influentes no desgaste da ferramenta são: deformação do gume, abrasão, adesão, difusão e oxidação (FERRARESI, 1977). A Figura 7 apresenta os principais desgastes ocorridos na usinagem.



Fonte: Konig e Klocke (1997, apud BARBOSA 2009, p.30)

Segundo Machado *et al.* (2009) somente os mecanismos de adesão e abrasão se fazem presentes em baixas temperaturas, porém o principal é a adesão. Já em elevadas temperaturas, os principais mecanismos são oxidação e difusão. Nota-se que quando a temperatura se eleva esses dois mecanismos aumentam, e a difusão cresce em grande escala.

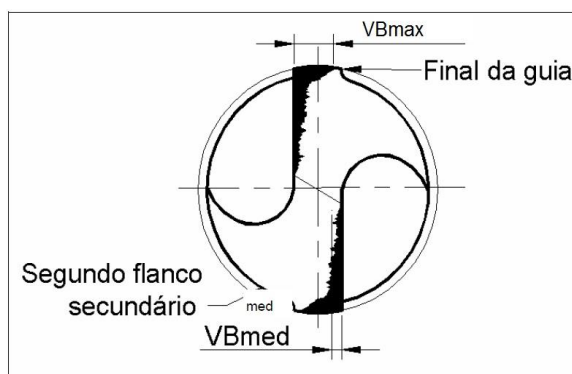
## 2.7 TIPOS DE DESGASTE

Os tipos mais comuns de desgastes e danos que aparecem nas brocas serão descritos a seguir:

### 2.7.1 Desgaste de flanco (VB)

Na extensão do gume da broca acontece o desgaste de flanco. A Figura 8 mostra a dimensão média de desgaste  $VB_{med}$  e a dimensão máxima,  $VB_{max}$ . O valor total da média entre as duas arestas é a largura do desgaste da broca. Ao longo da usinagem a aresta desgastada vem a ser uma referência nula, por isso as dimensões de VB, devem ter como base a aresta da broca nova (MOCELLIN, 2002).

FIGURA 8 – Desgaste de flanco

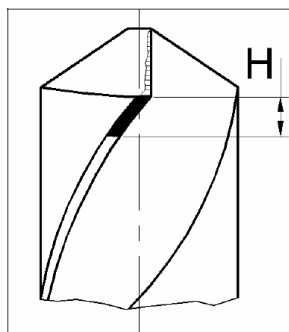


Fonte: Bork (1995, apud MOCELLIN, 2002, p. 18)

### 2.7.2 Desgaste das guias (H)

As avarias de desgastes nas guias são mensuradas a partir da quina da broca, conforme a Figura 9. O aumento de atrito entre a peça e a ferramenta faz com que aumente a temperatura na quina levando à dilatação térmica, o que pode ocasionar trepidação no processo de furação, causando a fragmentação da broca (OLIVEIRA, 2008).

FIGURA 9 – Desgaste nas guias das ferramentas

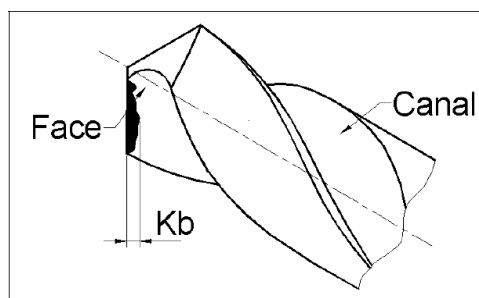


Fonte: Bork (1995, apud MOCELLIN, 2002, p. 18)

### 2.7.3 Desgaste de cratera (k)

Nas faces das brocas é identificado o desgaste de cratera, definido pela distância  $K_b$ , a qual é mensurada da posição mais afastada do lado oposto da cratera em relação à aresta de corte, desgaste também definido por  $K_T$ , no caso de profundidade da cratera (MOCELLIN, 2002). A Figura 10 mostra o desgaste de cratera em brocas.

FIGURA 10 – Desgaste de cratera em brocas

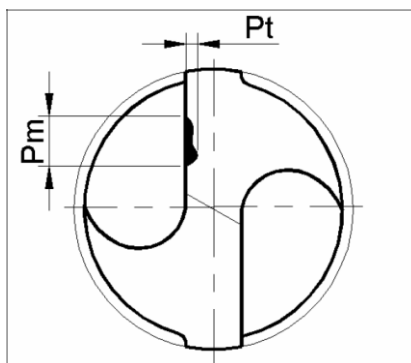


Fonte: Bork (1995, apud MOCELLIN, 2002, p. 19)

### 2.7.4 Lascamento dos gumes

Segundo Pereira (2010), as áreas irregulares e ásperas se dão devido à ruptura da aresta, denominada por lascamento. O mesmo ocorre devido a causas como: acúmulo de material na peça, interrupção de corte ou impacto, ângulo de cunha reduzido, conforme a Figura 11.

FIGURA 11 - Lascamento da aresta principal da broca

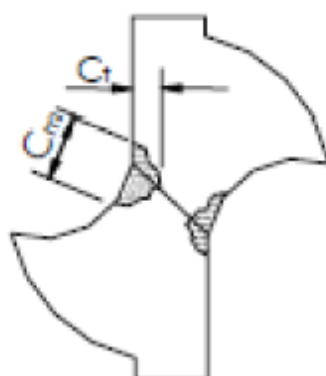


Fonte: Bork (1995, apud MOCELLIN, 2002, p. 19)

### 2.7.5 Desgaste do gume transversal

Silva (2010) conclui em seus ensaios que os tipos de desgastes predominantes nas ferramentas foram o da ponta de corte associado com o desgaste da guia e do flanco. Tais desgastes nas áreas de corte das brocas foram determinantes em seu colapso, relacionado a danos na quina, onde se concentram velocidades maiores, resultando em elevadas temperaturas na zona de corte. A Figura 12 mostra esse desgaste.

FIGURA 12 - Desgaste na ponta da broca



Fonte: Kanai; Kanda (1979, apud SILVA 2010, p. 41)

## 2.8 AVALIAÇÃO DE DESGATES DE BROCAS

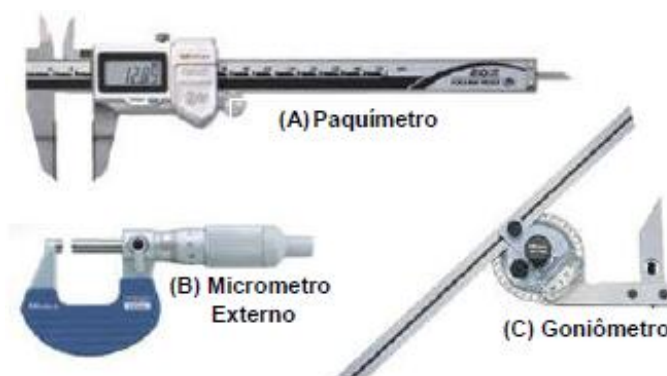
A avaliação dos desgastes tem a finalidade de determinar os parâmetros, consequentes de esforços causados nas mais variadas formas de operação, tais como avanço, geometria, velocidade de corte, estado do desgaste e pressão de corte. A relação entre a força de corte gerada com os parâmetros dos ensaios é especificada a partir dos resultados obtidos, principalmente do processo de furação e da qualidade dos furos.

Fortunato (2012) descreve que a análise do desgaste pode ser feita na forma de mensuração direta na ferramenta, com o auxílio de instrumentos de medição como: microscópio, análise de imagens, entre outros equipamentos apropriado para avaliar as perdas gradativas que ocorrem no processo de usinagem.

### 2.8.1 Medição direta

Na avaliação por medição direta podem ser utilizados paquímetros externos, pois medem as partes cilíndricas da ferramenta, ou até mesmo micrômetros que possuem precisões superiores aos do paquímetro e medem dimensões lineares externas. Na extremidade da broca, por seus vários ângulos, pode ser utilizado o goniômetro, pois este instrumento tem a função de medir superfícies angulares e sua precisão varia com o modelo do instrumento (MITUTOYO, 2014; FORTUNATO, 2012). A Figura 13 mostra os instrumentos utilizados para a medição direta.

FIGURA 13 - Paquímetro (A), micrometro externo (B), goniômetro (C)

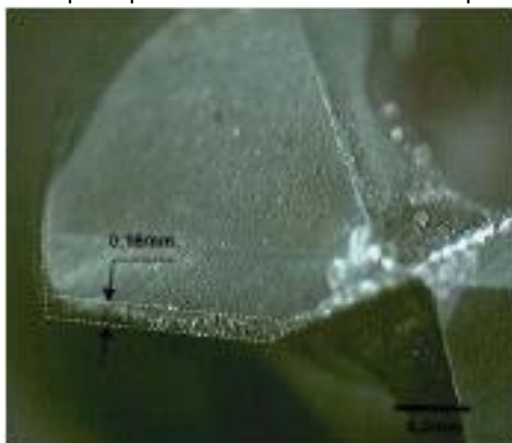


Fonte: Mitutoyo (2014, p.6,7 e 15)

### 2.8.2 Microscópio e análise de imagens

Um método bastante usual em pesquisas são os microscópios. Fortunato (2012) cita que a broca é fotografada antes de ser utilizada com o auxílio de um microscópio óptico com captura de imagem; em seguida, a ferramenta executa a usinagem normalmente. Após os ensaios, a mesma broca é fotografada uma segunda vez. As imagens de antes e depois da usinagem são analisadas com *softwares* que permitem realizar medições nas imagens da ferramenta. As imagens geradas pelo microscópio com auxílio de *software* podem ser analisadas por várias dimensões (PEREIRA, 2010). A Figura 14 mostra a extremidade de corte de uma broca analisada por este método.

FIGURA 14 – Aresta principal de uma broca analisada por meio de imagem



Fonte: Pereira (2010, p.110)

Pereira (2010) mostra em seus resultados que houve desgaste significativo na broca somente na superfície de incidência, o que caracterizou desgaste em flanco devido à abrasão.

### 2.8.3 Balança de precisão

Outro procedimento para avaliar o desgaste nas ferramentas é a análise por perda ou ganho de massa. Segundo Mendes (2011), o volume de desgaste é calculado a partir da variação do peso da amostra, método que pode ser limitado especialmente quando avalia-se materiais de alta dureza, como brocas revestidas.

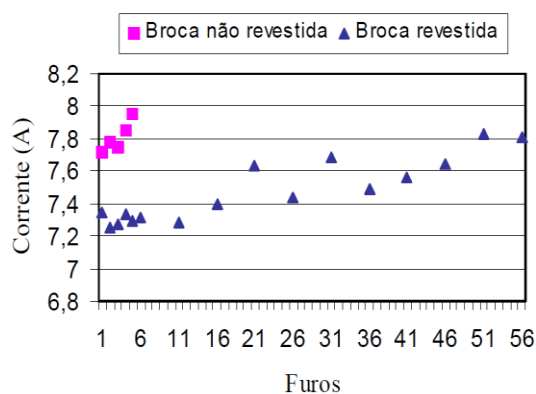
Mendes (2011) conclui que para obter os resultados da avaliação, primeiro deve ser registrado o valor total da massa da broca antes de sua utilização e Após todas as perfurações, só então é possível chegar à média da variação da massa. Os resultados de desgaste por variação de massa não foram significativos, pois não apresentaram variação relevante fora dos limites do desvio padrão.

#### 2.8.4 Medição da corrente elétrica

Segundo Vieira et al. (1999), o desgaste pode ser medido pela corrente consumida em cada ciclo de furação, comparando os primeiros ciclos com os últimos.

A ação dos revestimentos de TiN diminui o atrito e o desgaste nas áreas de interação entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, minimizando as forças de corte e assim reduzindo o consumo de energia. A Figura 15 mostra a influência do tempo de usinagem na corrente, com brocas revestidas e não revestidas.

FIGURA 15 - Influência do tempo de usinagem na corrente, com brocas revestidas de TiN e não revestidas

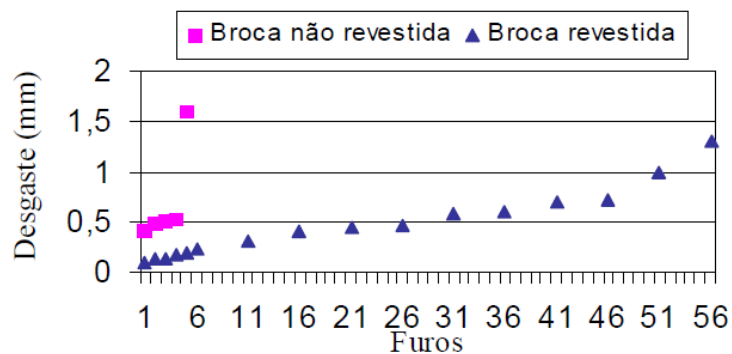


Fonte: Vieira et al., (1999, p.5)

Nas duas condições de corte baseadas em brocas sem revestimentos e com revestimentos de TiN aplicados para a avaliação da corrente elétrica, Vieira *et al.* (1999) perceberam que houve um aumento nos valores do desgaste, na qual a elevação dessa corrente é consequência do desgaste, pois sua elevação cria uma área de contato mais ampla entre ferramenta/peça/cavaco. A Figura 16 mostra que as brocas sem revestimento realizaram menos furos e apresentaram maior desgaste em

relação à broca de TiN.

FIGURA 16 – Influência do tempo de usinagem no desgaste, com brocas revestidas e não revestidas

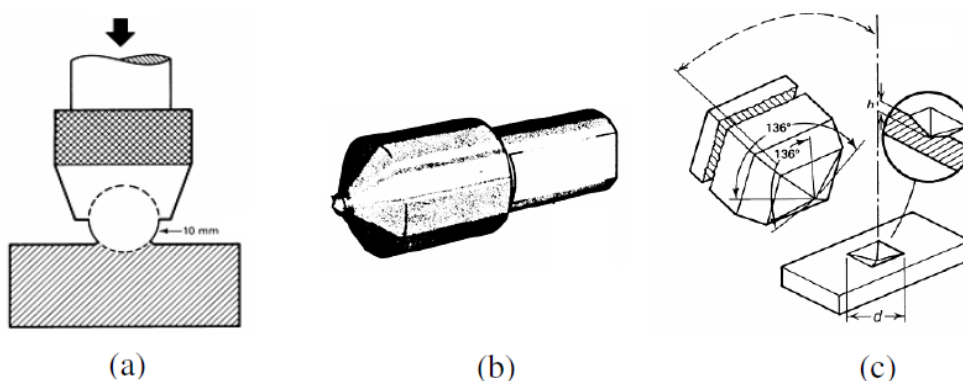


Fonte: Vieira et al., (1999, p.5)

### 2.8.5 Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza são baseados no esforço de penetração na área do material, através de uma carga aplicada por um equipamento. Os mais utilizados para avaliar a dureza dos materiais metálicos são o Brinell, o Rockwell e Vickers. O primeiro usa indentador com esfera, o segundo ponta piramidal e o terceiro cônica (BERTOL, 2009). A Figura 17 mostra os três tipos de indentadores.

FIGURA 17 - Tipos de indentadores utilizados para medir a dureza a) Brinell, b) Rockwell e c) Vickers



Fonte: American Society for Metals (2000, apud BERTOL, 2009, p.6)

A Unidade de medida em Vickers é  $\text{Kgf/mm}^2$ , sistema esse de medição que proporciona uma escala constante de dureza, para um determinado esforço, conseguindo definir a dureza desde materiais moles até materiais excessivamente duros. A definição da dureza dos metais é um mecanismo de controle de qualidade indispensável na engenharia e na indústria (CHIAVERINI, 1986).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais que foram utilizados na execução dos ensaios, assim como a organização utilizada com base nas referências teóricas.

Todos os processos foram realizados nos laboratórios do IFSC, como parte de um projeto de pesquisa na área de usinagem, entre outubro de 2014 a julho de 2015.

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado na confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de furação foi o Ferro Fundido Nodular, obtido pelo processo de fundição contínua. Segundo a norma NBR 15850 (2010) é classificado como FE 45012, com estrutura predominantemente Ferrítica/perlítica. A sua composição química está apresentada na Tabela 6.

TABELA 6 – Composição química do ferro fundido nodular FE 45012

| Composição Química (%) |     |     |       |       |      |     |       |
|------------------------|-----|-----|-------|-------|------|-----|-------|
| C                      | Si  | Mn  | P     | S     | Cr   | Cu  | Mg    |
| 3,3                    | 2,9 | 0,2 | 0,044 | 0,01  | 0,05 | 0,1 | 0,035 |
| -                      | -   | -   | -     | -     | -    | -   | -     |
| 3,5                    | 3,1 | 0,2 | 0,054 | 0,013 | 0,05 | 0,1 | 0,045 |

Fonte: O próprio autor (2015)

As barras utilizadas nos testes apresentam as seguintes características conforme a NBR 15850 (2010):

- 78 % de matriz ferrítica;
- 22% de perlita;
- I - II classificação da grafia;
- Tamanho dos nódulos entre 6 – 5 mm;
- 95 % Nodularização.

O ferro fundido FE 45012 apresenta as seguintes propriedades mecânicas:

- Resistência à tração: 476 MPa;
- escoamento: 356 MPa;
- Alongamento: 16, 1%.

A organização dos furos no corpo de prova determina o seu aproveitamento em termos de comprimento de furação. O corpo de prova com sua superfície faceada é mostrado na Figura 18.

FIGURA 18 - Corpo de prova faceado



Fonte: O próprio autor (2015)

Para a realização das furações utilizaram-se três tipos de brocas helicoidais padronizadas pela norma DIN 338: aço rápido sem qualquer revestimento, revestimento comercial de TiN e brocas com tratamento termoquímico de boretação sólida. Nesta última, porém, o tratamento de boretação foi realizado posteriormente em laboratório, pois a mesma foi adquirida na sua forma original como broca de aço rápido sem revestimento. As brocas utilizadas possuem as seguintes especificações: maciça (marca TDC), diâmetro de 12 mm, com comprimento total de 151 mm, corte no sentido horário e ângulo da ponta de 118°. Foram utilizadas 36 brocas para realização dos experimentos, sendo 3 brocas para cada condição de usinagem, dentre elas 12 brocas sem revestimento, 12 brocas revestidas com TiN e 12 boretadas.

A Figura 19 mostra as brocas HSS, com revestimento de TiN e de Boro.

FIGURA 19 - Brocas utilizadas nos ensaios, HSS, com revestimento de TIN e de Boro



Fonte: O próprio autor (2015)

### 3.2 EQUIPAMENTOS

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC Romi – modelo D600 com comando Fanuc Oi TD equipado com ferramenta de faceamento e furação. Como pode ser visto na Figura 20.

FIGURA 20 - Centro de usinagem vertical CNC ROMI D600



Fonte: O próprio autor (2015)

Para a verificação dos desgastes nas brocas por perda de massa, foram realizadas medições em cada broca antes e após os ensaios de furação. Para isso utilizou-se uma balança analítica modelo AUX 220 com resolução de 0,01mg – 0,1g capacidade de 82 – 220g, peso de aferição de 200g e com dimensões de 220(L) x 330 (P) x 310 (A) mm, a Figura 21 mostra a balança analítica utilizadas nos ensaios.

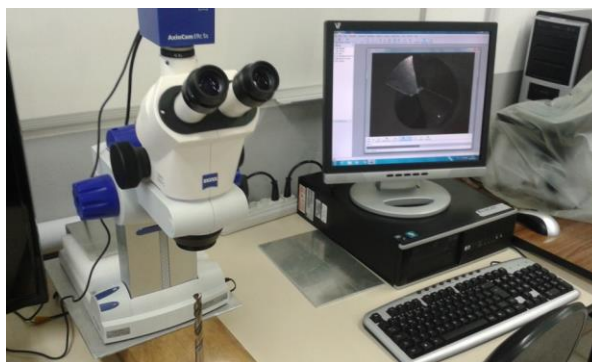
FIGURA 21 - Balança analítica AUX 220



Fonte: O próprio autor (2015)

Os mecanismos de desgaste foram determinados através de imagens obtidas por microscópio estereoscópio modelo stemi 2000-C com ampliações de 1.95X para 250X vezes, iluminação forçada, e imagens 3D. A análise das imagens foi realizada utilizando o *software AXIO VISION release 4.8.2 SP2(06-2012)*. A Figura 22 mostra o microscópio pelo qual foram obtidas as imagens das brocas antes e após a usinagem.

FIGURA 22 - Microscópio estereoscópio Stemi 2000-C



Fonte: O próprio autor (2015)

O monitoramento da corrente dos motores foi realizado utilizando um analisador de qualidade de energia Fluke 430, com as seguintes especificações: Trifásica, medindo os parâmetros de tensão, corrente, potência, consumo de energia,

desequilíbrio e oscilações, com memória para registrar 400 parâmetros, quatro canais medindo simultaneamente tensão e corrente nas três fases e no neutro. Este equipamento pode ser visto na Figura 23.

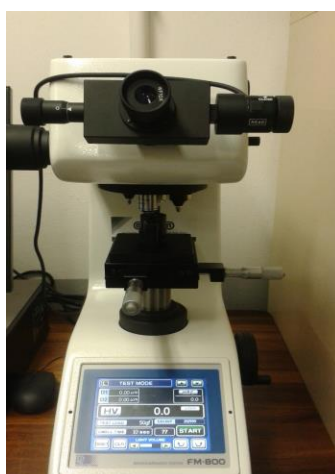
FIGURA 23 – Analisador de qualidade de energia trifásica Fluke Série 430



Fonte: O próprio autor (2015)

Os ensaios de microdureza Vicker's foram realizados em microdurômetro de modelo FM-800 com visor de precisão de 50 mm, indentador diamante (HV), disponível em cinco variações com cargas de ensaio de 5 a 2000gf. A Figura 24 mostra o microdurômetro utilizado nos testes.

FIGURA 24 - Microdurômetro modelo FM-800



Fonte: O próprio autor (2015)

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 Realização do revestimento de Boro

O processo de revestimento das brocas de aço rápido, com revestimento termoquímico de boro foi realizado por uma empresa externa, o qual foram enviadas 12 brocas. Solicitou-se que elas tivessem uma dureza de 62 a 64 HRC.

Para se obter o revestimento solicitado, foi realizado um tratamento de têmpera e revenimento. Elas foram colocadas no forno a uma temperatura de 1000°C com 2 horas de duração, quando se chegou a uma dureza de 63 HRC. A Figura 25 mostra a imagem de uma broca com camada de boro, a partir do uso de um microscópio.

FIGURA 25 – Broca com camada de Boro



Fonte: O próprio autor (2015)

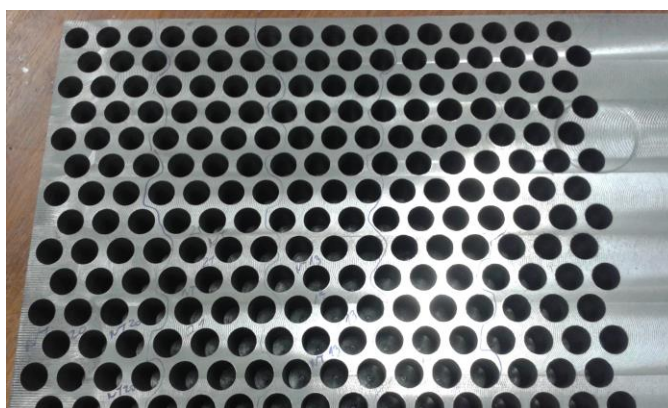
#### 3.3.2 Realização dos ensaios de furação

Para a realização dos ensaios de furação, foram utilizados os parâmetros máximos e mínimos de avanço e velocidade de corte disponível do catálogo do fabricante de ferramentas. Assim, as velocidades de corte escolhidas foram de 35 e 20 m/min., e avanço de 0,1 e 0,2 mm/rot. Foram realizados 40 furos por broca e 3 repetições para cada condição de usinagem.

Para a realização das furações foram adquiridas barras em formato retangular com dimensões de 200 mm de largura, 510 mm de comprimento e 60 mm

de espessura. Foram realizadas furações nas faces superior e inferior das barras, com brocas de 12 mm e profundidade de corte de 3 vezes o diâmetro da broca, a distância entre centros dos furos foi de 24mm. Antes da realização das furações, a barra foi faceada por fresamento para retirar possíveis imperfeições da fundição, como mostra a Figura 26.

FIGURA 26 – Furações no corpo de prova



Fonte: O próprio autor (2015)

As identificações das brocas foram feitas de acordo com exemplo a seguir, onde foram identificados pelo revestimento, velocidade de corte e avanço:

Revestimento = H – HSS sem revestimento; N – HSS TiN; B – HSS Boretção Solida.

$V_c$  m/min. = A – 35m/min. (Alta rotação); B – 20 m/min. (Baixa rotação).

$f$  mm/rev = 1 – 0,1 mm/ver ; 2 – 0,2 mm/ver.

A Tabela 7 mostra o planejamento experimental para os ensaios de furação. É possível verificar que foi variado o tipo de broca, velocidade de corte, avanço e identificar a condição de usinagem.

TABELA 7 - Matriz de planejamento

| <b>Condições</b> | <b>Vc m/min</b> | <b>f mm/rev</b> | <b>Revestimento</b>    |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| H.B1             | 20              | 0,1             | HSS – Sem revestimento |
| H.A1             | 35              |                 |                        |
| H.B2             | 20              | 0,2             |                        |
| H.A2             | 35              |                 |                        |
| N.B1             | 20              | 0,1             | HSS – TiN              |
| N.A1             | 35              |                 |                        |
| N.B2             | 20              | 0,2             |                        |
| N.A2             | 35              |                 |                        |
| B.B1             | 20              | 0,1             | HSS – Boretação sólida |
| B.A1             | 35              |                 |                        |
| B.B2             | 20              | 0,2             |                        |
| B.A2             | 35              |                 |                        |

Fonte: O próprio autor (2015)

### 3.3.3 Análise da corrente do motor

Para a determinação do desgaste por variação da corrente do motor, os ensaios foram monitorados durante a furação pelo equipamento analisador de qualidade de energia, equipado com dispositivo de medição de corrente elétrica, da marca Fluke. Para captar os registros foram conectados na máquina os alicates de medição nas três fases e um no terra da máquina, como mostra a Figura 27.

FIGURA 27 – Equipamento utilizado para medição da corrente

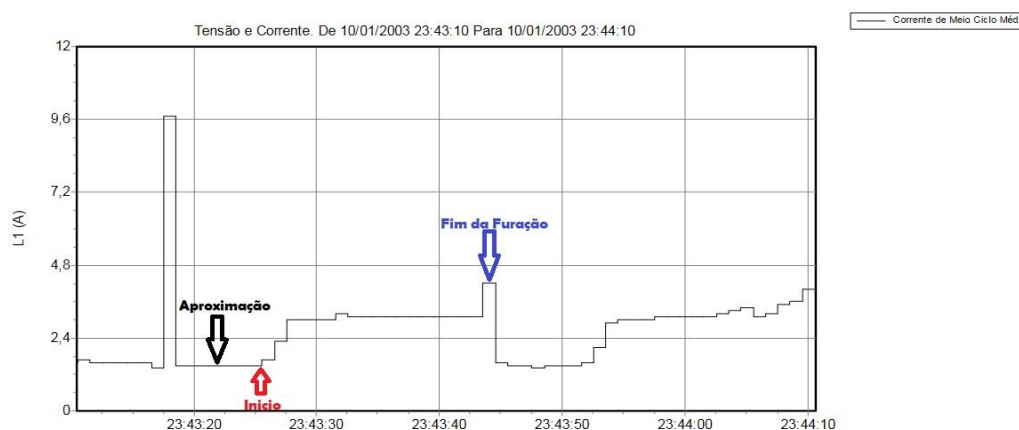


Fonte: O próprio autor (2015)



Os dados foram enviados para o aparelho que faz o registro das leituras MIN, MAX E MED, através do *software Power Log*, só então foi possível analisar as oscilações geradas durante a usinagem, e posteriormente elaborar relatórios. A tensão teve variação máxima de 1 V, o que está dentro dos padrões aceitáveis. Na Figura 28 pode ser observado um exemplo de variação da corrente no processo e suas variáveis. Também é possível perceber a aproximação da broca antes de iniciar a furação e o seu recuo no fim da operação, o qual ocorre sucessivamente para os próximos furos.

FIGURA 28 - Variação da corrente



Fonte: O próprio autor (2015)

### 3.3.4 Análise da variação de massa das brocas

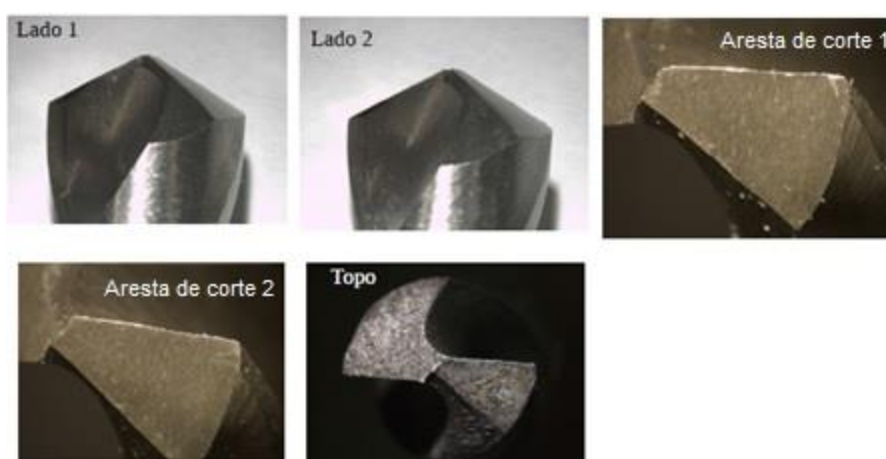
Para a verificação dos desgastes das brocas através da perda de massa, foram realizadas medições de massa de cada broca antes e após os ensaios de furação. A medição de massa das brocas foi realizada no laboratório com controle de umidade e temperatura com 23,2°C e 64% de umidade. Realizaram-se três medições para cada broca analisada.

### 3.3.5 Análise por imagens

As brocas utilizadas nos ensaios foram fotografadas com o auxílio de um microscópio estereoscópio modelo Stemi 2000-C, no qual foi utilizada uma ampliação de 8X com iluminação forçada nos ensaios realizados.

Para permitir que as brocas fossem fotografadas sempre na mesma posição, foi desenvolvido um dispositivo de fixação, fabricado em madeira com dois furos de diâmetro 12 mm, um orifício com inclinação de 59° para avaliar as arestas de corte e outro que possibilitou a fixação da broca em 90° para a análise de topo. O objetivo foi facilitar a observação das variações e dimensões das brocas. A ferramenta foi fotografada em cinco posições diferentes: lado “1”; lado “2”, aresta de corte “1”; aresta de corte “2” e topo, como mostra a Figura 29.

FIGURA 29 - Posições em que as brocas helicoidais foram fotografadas



Fonte: O próprio autor (2015)

### 3.3.6 Análises de microdureza

Foram realizados testes de dureza nas brocas com o intuito de analisar as influências da camada de revestimento no corpo da broca e nas suas bordas.

Utilizando-se uma carga de 50 gf, durante um tempo de 10s nas amostras das brocas, e possível verificar a dureza que é fornecido em Vickers ou Rockwell como mostra a tela do microdurômetro na Figura 30. Cada ensaio compreendeu no mínimo de 6 identações, onde se realizou 3 identações no centro do corpo de prova e 3 identações nas laterais das paredes.

FIGURA 30 – Tela do microdurômetro mostrando os resultados dos ensaios



Fonte: O próprio autor (2015)

As amostras para a realização dos ensaios de dureza foram preparadas a partir de corpos de prova dos 3 tipos de brocas estudados. Para tanto, as brocas foram embutidas em baquelite para se garantir também menores desvios de planicidade e retenção de bordas. Em seguida, elas lixadas com lixas de 220, 320, 400, 600, 1200 mesh, e finalmente polidas. A Figura 31 mostra uma broca embutida, após análise no microdurômetro.

FIGURA 31 – Amostra de broca embutida



Fonte: O próprio autor (2015)

Bertol (2009) conclui que o procedimento por Vickers apresenta melhor desempenho, devido às baixas oscilações em seus resultados. Esse procedimento também requer uma distância mínima de 1,5 vezes a média das diagonais da indentação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados a avaliação do desgaste das brocas por imagens, por perda de massa, pela corrente do motor, os resultados da variação da velocidade de corte e avanço e os tipos de revestimento nas brocas. Também foi mostrada a análise da dureza dos três tipos de materiais utilizados nos experimentos.

### 4.1 AVALIAÇÃO POR VARIAÇÃO DE MASSA

Os resultados de desgaste medidos através da diferença de massa antes e após as furações são representadas na Tabela 8. Na apresentação dos resultados os valores negativos são referentes às brocas que tiveram ganho de massa durante a usinagem. Os campos que não apresentam valores são as condições que houve quebra das brocas durante a furação.

TABELA 8 - Desgaste medido através da variação de massa das brocas

| Condição | Desgaste / Perda de Massa |               |
|----------|---------------------------|---------------|
|          | Média (mg)                | Desvio padrão |
| H.B1     | 0,1860                    | 0,1392        |
| H.A1     | 0,1450                    | 0,6259        |
| H.B2     | -0,1736                   | 0,1066        |
| H.A2     | 0,0757                    | 0,1074        |
| N.B1     | 0,0395                    | 0,1805        |
| N.A1     | 0,0567                    | 0,0478        |
| N.B2     | 0,0115                    | 0,0139        |
| N.A2     | 0,0575                    | 0,0900        |
| B.B1     | 0,2199                    | 0,1329        |
| B.A1     | 0,2147                    | 0,0874        |
| B.B2     | -0,0176                   | -             |
| B.A2     | -                         | -             |

Fonte: O próprio autor (2015)

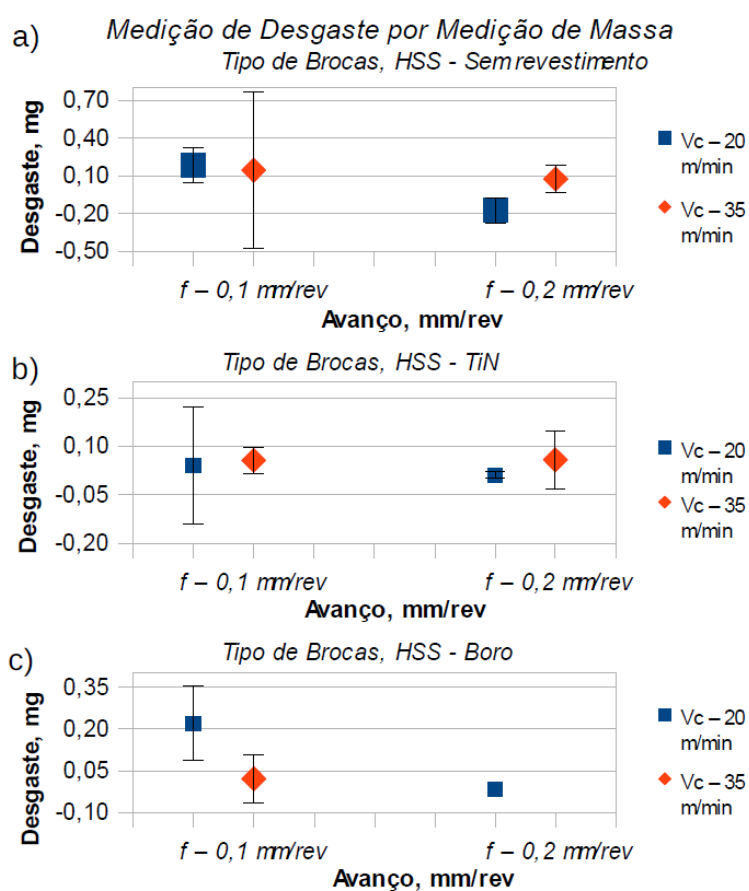
Marmentini (2009) em seu estudo conclui que as brocas nitretadas apresentaram menor desgaste em relação as sem revestimento e de metal duro, apresentando um desgaste menor em 18 % em relação as demais, a deterioração nas brocas sem revestimento se deu pelo fator abrasivo, principalmente em suas arestas, e a de metal duro apresentou grandes lascamentos nas quinhas, o que se entende que os desgastes nem sempre perdem massa, mais ganham devido a adesão de material

na ponta da broca, assim mascarando os resultados em análise.

## 4.2 EFEITO DO AVANÇO DE CORTE

Avaliando os efeitos do avanço de corte na furação é possível verificar que, na Figura 32, somente na condição de velocidade de corte de 20m/min houve variação significativa nas medidas de massa com o aumento do avanço de corte.

FIGURA 32 – Efeito do avanço no desgaste das brocas de aço rápido para os 3 tipos de superfície



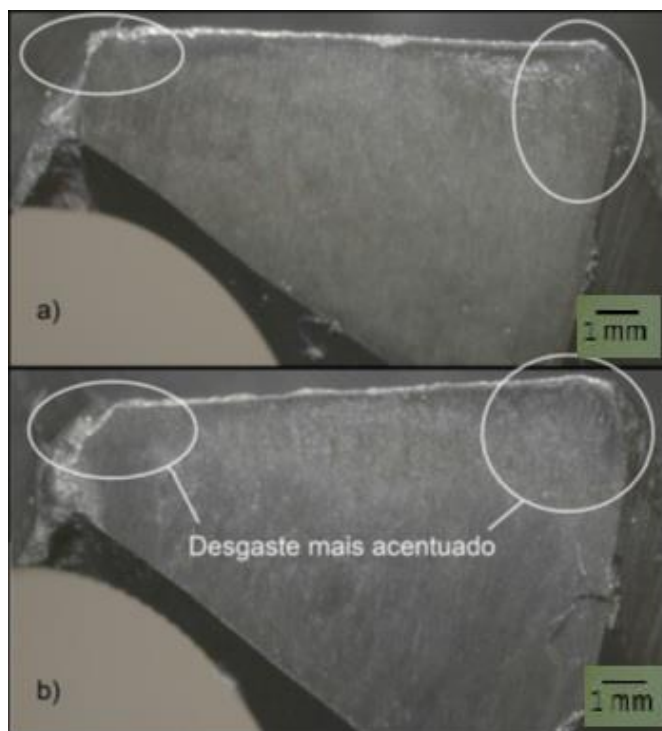
Fonte: O próprio autor (2015)

Isso pode estar relacionado com a severidade dos parâmetros, ou seja, um alto valor de avanço com velocidade de corte baixa proporciona um certo desgaste da ferramenta, porém facilita o acúmulo de material nas arestas de corte. A Figura 33 mostra o desgaste ocorrido nas arestas de corte da broca usinada com a condição H.B1 comparada com a H.B2.

Um acúmulo de material na aresta transversal de corte da broca usinada

com a condição H.B2 também é possível verificar na Figura 33. Ferraresi (1977) cita que quando se aumenta a velocidade de avanço, o resultado que se tem é um aumento da temperatura de corte, o que ocasiona várias avarias na ponta da broca pelo aquecimento excessivo.

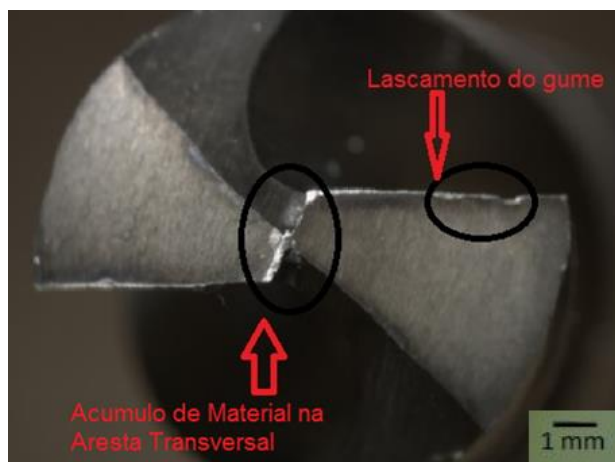
FIGURA 33 – Desgaste das arestas de corte das brocas usinadas com os parâmetros a) H.B1 b) H.B2



Fonte: O próprio autor (2015)

Segundo Pereira (2010), a aresta postiça ocorre devido ao encruamento do material da peça, que se fixa na face de saída gerando uma nova superfície de corte. Pode-se concluir que a deposição de material na superfície da ferramenta ocorre quando a temperatura for superior a 500°C, independente da velocidade de corte. A Figura 34 mostra uma imagem de topo da condição H.B1. É possível verificar que ocorreu lascamento na aresta principal classificada como gume e um pequeno acúmulo de material na aresta transversal de corte. Nesse caso, a medição de massa não apresenta eficiência na medição de desgaste em brocas.

FIGURA 34 - Desgaste ocasionado na condição H.B1



Fonte: O próprio autor (2015)

Na condição H.B2, com baixa velocidade de corte e um alto avanço, houve um ganho de massa. Dessa forma, é possível concluir que a medição do desgaste é mais eficiente através de imagens em relação à medição de massa.

A Figura 35 mostra a condição H.B2. É possível verificar a adesão de material da barra de ferro fundido na aresta transversal de corte. Outra vez, é mostrada a eficiência da medição do mecanismo de fim da vida da ferramenta de corte por análise de imagem.

Segundo Diniz (2013), a aresta postiça de corte é inevitável no centro da broca na região da aresta transversal, pois a velocidade de corte é baixa na furação em cheio. Mesmo representando apenas em torno de 15% do total da broca, a aresta auxilia no processo de furação em média com cerca de 50%, ou até 75% da força de avanço durante o processo, dependendo da ferramenta e o material utilizado.

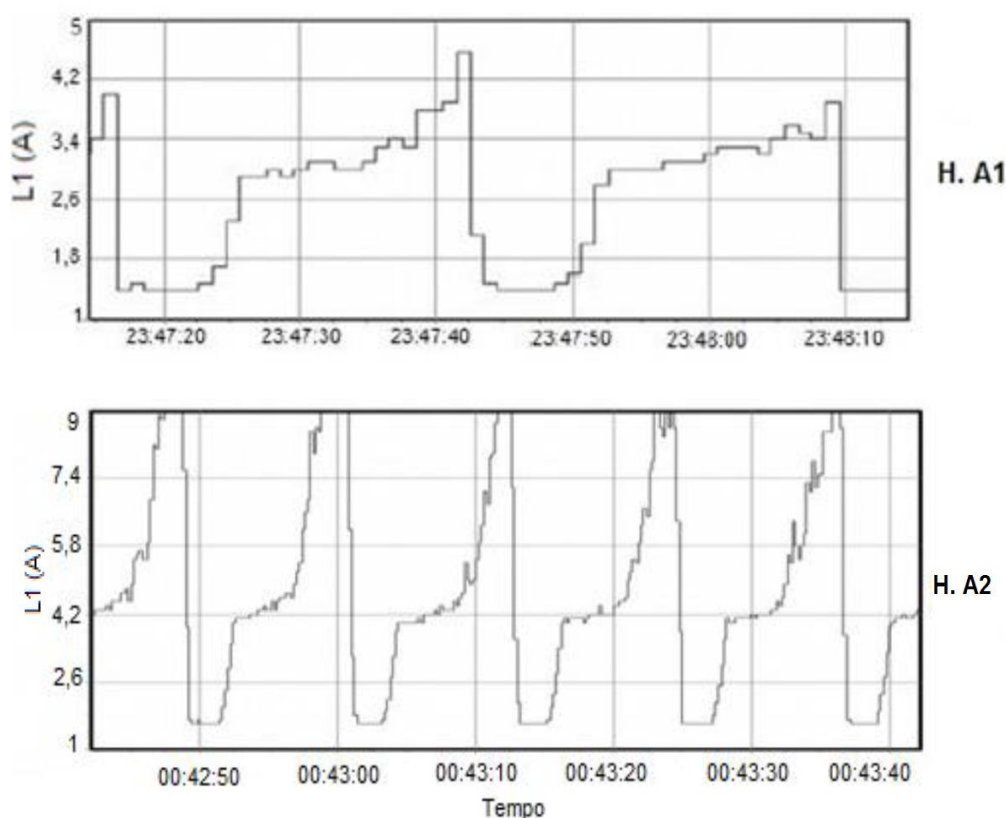
FIGURA 35 – Broca sem revestimento com acúmulo de material na ponta



Fonte: O próprio autor (2015)

O acúmulo de material reduz a eficiência do corte necessitando maior potência do motor do equipamento. Na Figura 36 é possível verificar o aumento da corrente do motor em aproximadamente 1 Ampere (A) e que durante o período da furação o valor da corrente do motor aumenta a partir da metade da furação.

FIGURA 36 – Valores de corrente do motor para as condições H.A1 e H.A2

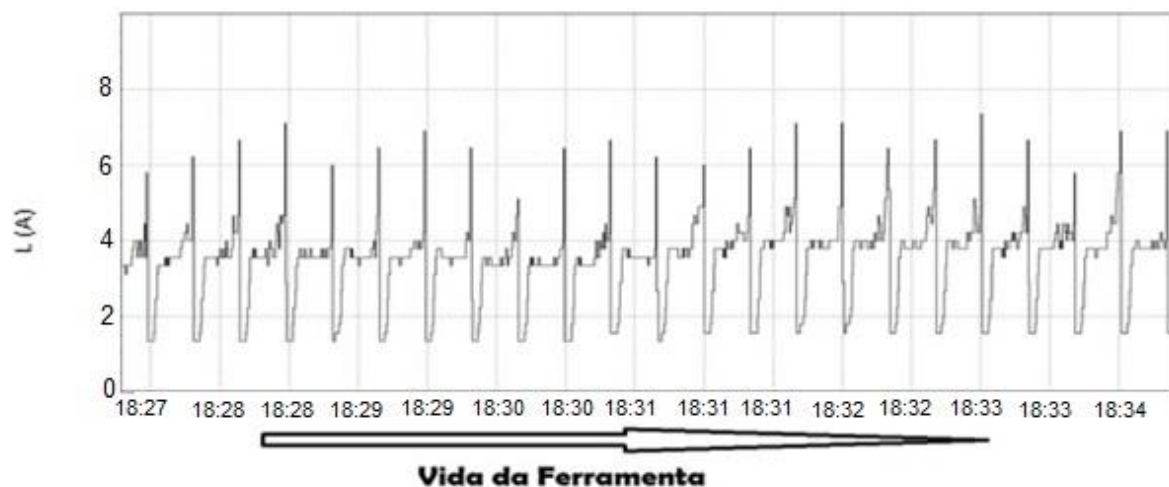


Fonte: O próprio autor (2015)

Castillo (2005) conclui que quanto menor for a superfície de saída dos cavacos em relação à quantidade de cavacos gerados, a força de avanço necessário será maior e o momento torçor de igual modo. Com isso é possível compreender o aumento da força de avanço e do momento torçor, em consequência da fricção das guias no comprimento do furo e os lascamentos na área do gume transversal, ocasionado pelo aumento do avanço. A Figura 37 mostra um aumento gradativo da corrente do motor à medida que a ferramenta se aproxima do final dos ensaios. Isso se deve ao desgaste sofrido no decorrer dos ensaios, perda de afiação, quando se exige mais força.



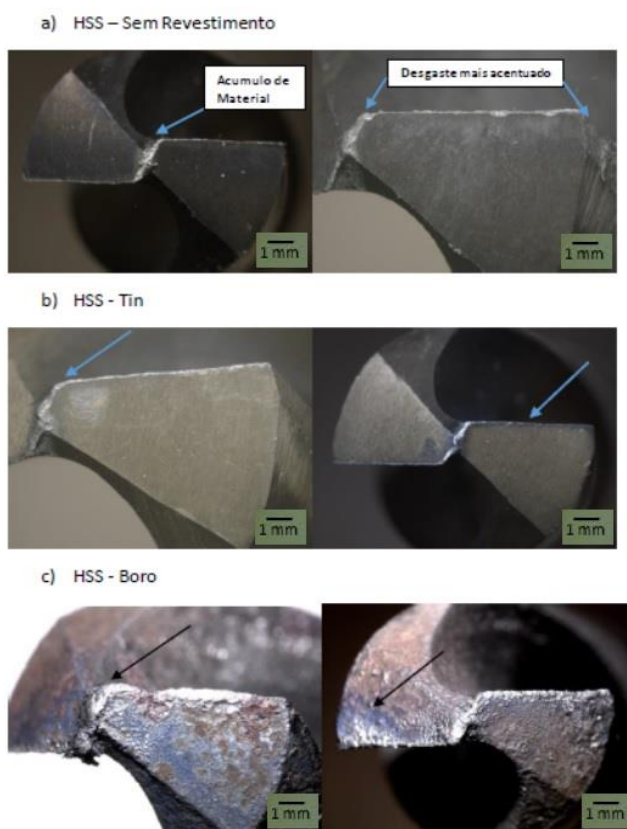
FIGURA 37 – Aumento gradativo da corrente



Fonte: O próprio autor (2015)

A Figura 38 mostra os principais efeitos provocados pelo avanço de corte, como acúmulo de material, escurecimento das arestas devido às altas temperaturas, perdas de partes devido às perdas de matérias das ferramentas.

FIGURA 38 – Efeitos provocados pelo avanço de corte nos 3 tipos de materiais

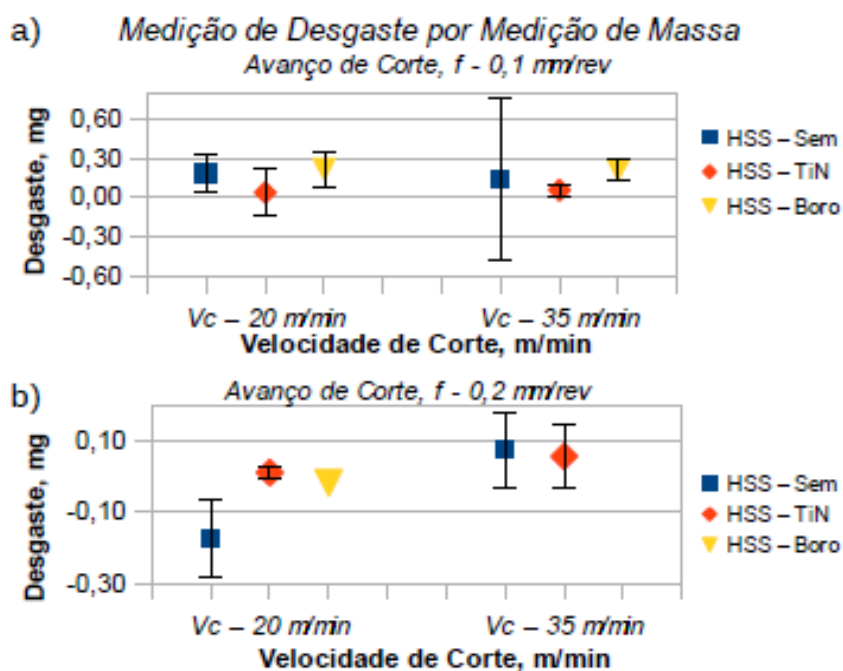


Fonte: O próprio autor (2015)

### 4.3 EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE

Na Figura 39 é possível analisar os resultados da influência da velocidade de corte das brocas no desgaste medido através da diferença de massa.

FIGURA 39 – Efeito da velocidade de corte no desgaste das brocas



Fonte: O próprio autor (2015)

Pode-se verificar, na Figura 39 a), que não houve variação significativa nas medidas de massa para as condições de corte com avanço de  $0,1 \text{ mm/rev}$ . porém, os valores da broca sem revestimento apresentaram um desvio padrão bastante elevado para a velocidade de corte de  $35 \text{ m/min}$ . Esse comportamento é justificado pela condição H.A1 apresentar desgaste e acúmulo de material na broca. Na Figura 39 b) é possível verificar que as brocas sem revestimento usinadas com velocidade de corte de  $20 \text{ m/min}$  apresentaram um ganho de massa com o aumento da velocidade de corte para  $35 \text{ m/min}$ .

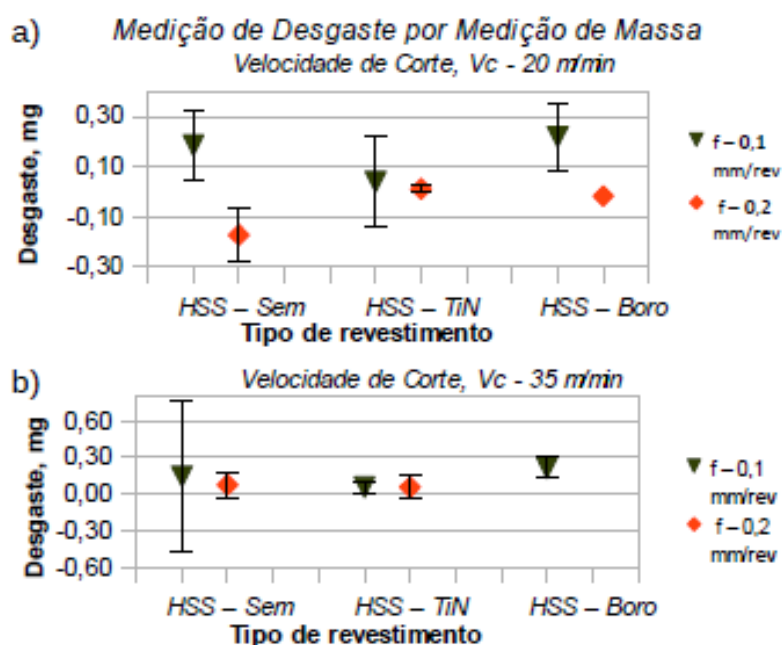
Segundo Marmentini, Pintaúde e Beltrão (2008) quando se eleva a velocidade de corte as brocas tendem a sofrer maiores desgastes e o material exerce influência significativa sobre estes. Então conclui-se que a velocidade de corte deve ser proporcional em relação ao avanço, pois ao contrário apresentará o mesmo ocorrido na Figura 39 b) que mostra a condição das brocas sem revestimento onde

houve adesão de material na aresta principal devido ao alto avanço aplicado em velocidade inferior.

#### 4.4 EFEITO DO TIPO DE REVESTIMENTO NO DESGASTE DAS BROCAS

A Figura 40 mostra o efeito do tipo de superfície das brocas na furação do ferro fundido com os diferentes valores de avanço e velocidade de corte.

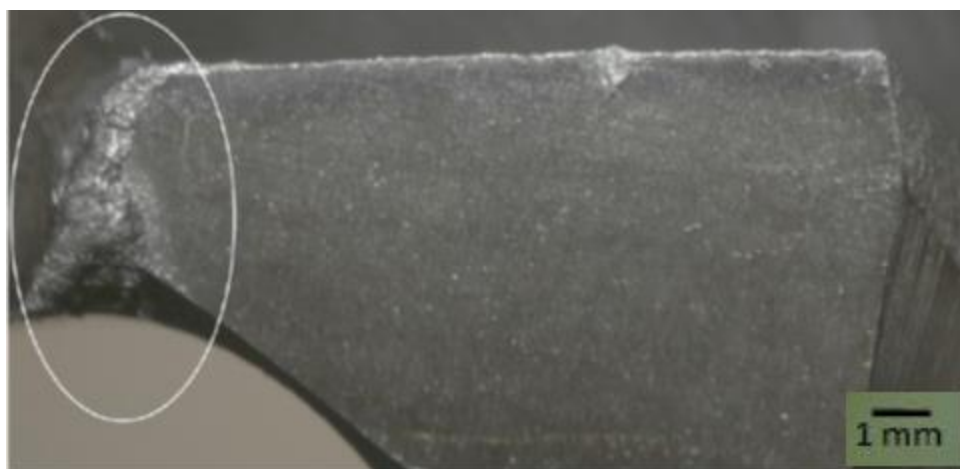
FIGURA 40 – Efeito do tipo de superfície no desgaste das brocas



Fonte: O próprio autor

É possível verificar que não houve diferenças significativas para valores de avanço de 0,1 mm/rev., indiferente da velocidade de corte. Porém, para as condições de corte com avanço de 0,2 mm/rev., pode-se perceber que, com velocidade de corte de 20m/min., as brocas sem revestimento apresentaram ganho de massa em comparação com as revestidas com Nitreto de Titânio, conforme apresentado na Figura 41.

FIGURA 41 – Acúmulo de material na broca para a condição H.B2



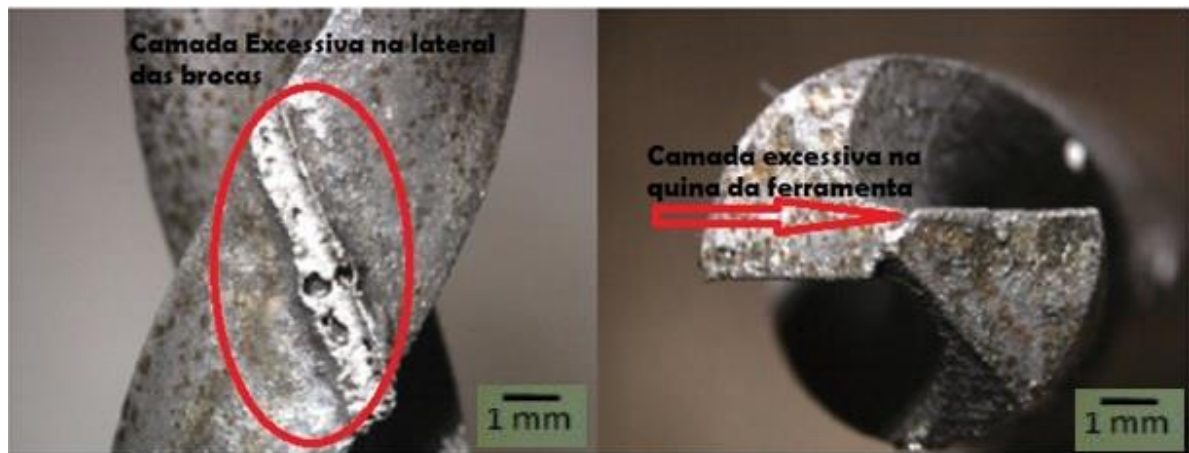
Fonte: O próprio autor (2015)

As brocas revestidas com Nitreto de Titânio não apresentaram este comportamento de acúmulo de material da barra na aresta transversal de corte para qualquer condição de usinagem. A medição da corrente do motor apresentou valores entre 2,8 A a 3 A para as condições H.B2 e N.B2.

As brocas de boro apresentaram os seguintes resultados nos ensaios, cada parâmetro teve 3 repetições. Por exemplo, no 1º ensaio desta condição foram realizados 2 furos, no 2º ensaio 26 furos e no 3º ensaio 3 furos, porém não foi possível conseguir dados para obter uma média de resultados para avaliação, devido à quebra prematuramente das brocas.

Foi constatado que as brocas com revestimento termoquímico de boretação sólida, apresentaram camadas de revestimento excessivo nas laterais, o que pode ter contribuído para essa fratura repentina, como se pode observar na Figura 42. Campos et al. (2007) avaliaram em seu trabalho dois tipos de revestimentos de Boro. O primeiro tipo foi exposto a uma temperatura de 1000°C; no segundo eles utilizaram uma temperatura de 900°C, ambos com um tempo de 4 horas. Com isso as espessuras sofreram modificação de 3 a 4 µm. Em seus ensaios obtiveram vários resultados diferentes, devido à elevada porosidade contida no processo de revestimento.

FIGURA 42 – Camadas excessivas nas laterais das brocas boretadas



Fonte: O próprio autor (2015)

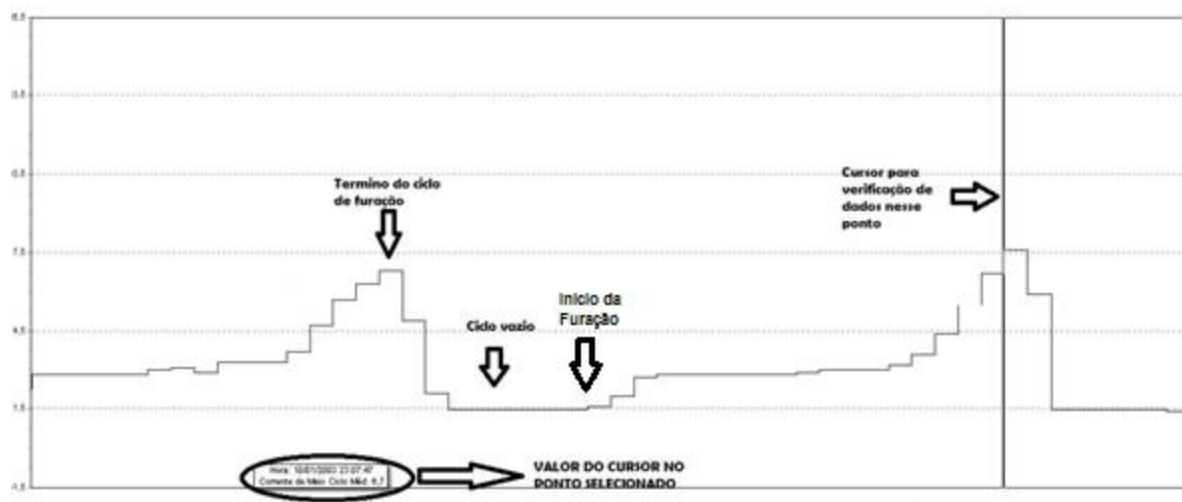
#### 4.5 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DAS BROCAS PELA CORRENTE DO MOTOR

Para medir o desgaste ocorrido no processo de furação, foram verificadas as oscilações na corrente do motor objetivando avaliar qualitativamente o que ocorre na usinagem. Através da coleta de dados fornecidos por um equipamento analisador de qualidade de energia, foi verificado que no início do processo de furação há um aumento da corrente em decorrência da velocidade de corte e avanço durante a usinagem.

Esses resultados apresentam uma corrente de 3,2 Amperes (A) nas condições sem revestimento e com revestimento de TiN no período inicial da furação. No período final houve uma variação de corrente de 5,2A a 6,7A, próximo aos 40 furos. No período em que a movimentação da broca ocorre em vazio apresenta-se uma corrente de 1,6 A, conforme mostra a Figura 43. É possível concluir que quando ocorre desgaste, exige-se mais força do motor.

Segundo Vieira et al. (1999) o consumo de energia tende a subir com a elevação dos desgastes da ferramenta. Em seu estudo, verificou-se que as brocas com revestimento de TiN apresentaram atrito e desgaste menor em relação às brocas sem revestimento, devido à redução das forças de corte.

FIGURA 43 – Especificações da furação no acompanhamento da corrente do motor

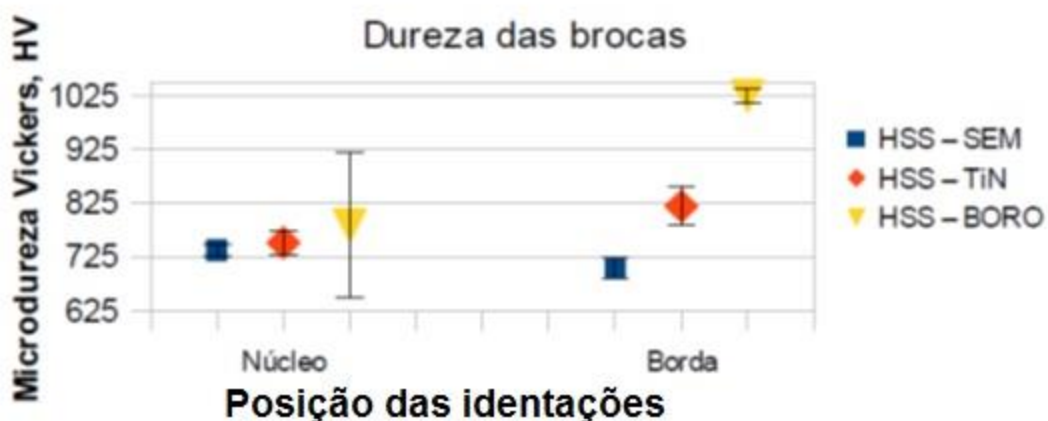


Fonte: O próprio autor (2015)

#### 4.6 DUREZA DAS BROCAS

A Figura 44 mostra os valores de microdureza Vickers (HV) medidas no núcleo e na borda das brocas sem revestimento, revestidas com Nitreto de Titânio e revestidas pelo processo de boretação sólida.

FIGURA 44 - Microdureza das brocas



Fonte: O próprio autor (2015)

Nesta figura, é possível verificar a diferença significativa na microdureza entre a borda e o núcleo das brocas em todos os revestimentos. Observando as brocas sem revestimento, a borda da broca apresentou dureza menor em relação ao

núcleo, promovendo uma característica melhor de absorção de impacto. Já para as brocas revestidas com Nitreto de Titânio, a borda é mais dura comparada com o núcleo. Nas brocas revestidas com Boro a borda apresenta dureza em torno de 23% maior em relação ao núcleo da broca e mais de 30% em relação ao aço rápido sem revestimento. Esta microdureza elevada ocorre devido ao tratamento térmico realizado para aplicação do revestimento, causando a fragilização das brocas revestidas com Boro.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram alcançados com êxito, pois o estudo realizado sobre a avaliação dos parâmetros de corte na furação do Ferro Fundido FE 45012, mostrou como resultado que o desgaste mais acentuado nas brocas sem revestimento e com revestimento de boro se deu devido ao aumento da velocidade de corte, a partir de então as mesmas tenderam a apresentar vários sinais de desgastes.

Com o aumento do avanço, nos ensaios de furação, as brocas sem revestimento e com revestimento de boro apresentaram elevado desgaste somente com a velocidade de corte 35m/min.

O melhor desempenho foi constatado nas brocas revestidas com Nitreto de Titânio nos parâmetros com velocidade de corte 20m/min. e avanço de 0,2 mm/rev.

O resultado menos favorável é o das brocas com revestimento de Boro, onde nos parâmetros com velocidade de corte 35m/min. e avanço de 0,2 mm/rev, todas as brocas que foram analisadas se quebraram.

O acúmulo de material na área transversal foi um dos fatores que apresentou o aumento da corrente do motor, fazendo com isso que se tivesse um maior esforço de corte.

A medição do desgaste das brocas por diferença de massa e corrente do motor não foi eficiente para prever o fim da vida da ferramenta;

A dureza na borda variou conforme o revestimento, as brocas de boro tiveram durezas elevadas, o que contribuiu para sua fragilização e a tornou quebradiça.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as seguintes sugestões:

- Fazer um novo estudo com as brocas HSS, TiN e Boro, aumentando



consideravelmente o número de furos a fim de avaliar a vida útil dessas ferramentas.

- Melhorar a qualidade do processo de boretação nas brocas HSS.
- Pesquisar as vantagens e efeitos da lubrificação no processo de furação.
- Verificar a circularidade da furação executada e suas influências.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6916**: Ferro Fundido Nodular ou Ferro Fundido com Grafita Esferoidal. Rio de Janeiro: Abnt, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6176**: Brocas Helicoidais. Rio de Janeiro: Abnt, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15850**: Barras de Ferro Fundido Cinzento e Nodular produzidas pelo processo fundição contínua. Rio de Janeiro: Abnt, 2010.

BARBOSA, Patrícia Alves. **FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS AUSTEMPERADOS E NODULAR PERLITICO**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

BERTOL, Helton Claudio. **DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA ACEITAÇÃO DE MEDIÇÕES DE DUREZA REALIZADAS COM DURÔMETROS PORTÁTEIS EM REGIÕES DE SOLDAS**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Inspeção de Equipamentos, Universidade Federal do Rio Grande Dosul, Porto Alegre, 2009.

CAMPOS, I. et al. **Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste borinding process**. 2007. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/apsusc](http://www.elsevier.com/locate/apsusc)>. Acesso em: 20 fev. 2016.

CASTILLO, Willian Jefferson González. **FURAÇÃO PROFUNDA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25 COM BROCAS DE METAL DURO COM CANAIS RETOS**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **TECNOLOGIA MECÂNICA**: Materiais de Construção. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **TECNOLOGIA MECÂNICA**: Processos de Fabricação e Tratamento. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986.

COROMANT, SANDVIK. **FURAÇÃO: COMO ESCOLHER SUA BROCA.** 2000. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW2.COROMANT.SANDVIK.COM/COROMANT/DOWNLOADS/CATALOGUE/POR/ROT\\_E.PDF](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/por/rot_e.pdf)>. ACESSO EM: 27 ABR. 2015.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Editora Edgard BLUCHER Ltda, 1977.

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. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2012.

FRANCKLIN, Alexandre Reis. **UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR.** 2009. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica, Uezo, Rio de Janeiro, 2009.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos.** São Paulo: Blucher, 2009.

GUESSER, Wilson Luiz et al. **USINABILIDADE DE PERFIS CONTÍNUOS DE FERROS FUNDIDOS NODULARES DAS CLASSES FE-45012 E FE-50007.** Joinville: UFSC, 2013.

MACHADO, Alisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2009.

MARMENTINI, Mozart Marcos. **ANÁLISE DA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR UTILIZANDO BROCAS HELICOIDAIS DE M2 NITRETADAS.** 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MARMENTINI, Mozart Marcos; PINTAÚDE, Giuseppe; BELTRÃO, Paulo André de Camargo. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FURAÇÃO SOBRE A GEOMETRIA E ACABAMENTO SUPERFICIAL DE FERROS FUNDIDOS UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 2008, Salvador. **Anais...** . Salvador: Conem, 2008. p. 1 - 7.

MENDES, Gabriel Cury Batista. **Avaliação de desgaste, massa e rugosidade de brocas com superfície de aço, com revestimento de carbono e zircônia, para implantes osteointegrados, submetidas à osteotomias e esterilizações em autoclave.**2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Odontologia, Instituto Latino Americano de Pesquisa e Ensino Odontológico, Curitiba, 2011.

MITUTOYO. **CATALOGO DE PRODUTOS BÁSICOS PARA METROLOGIA DIMENSIONAL:** Catálogo N° PB 313. 2014. Disponível em: <[http://www.mitutoyo.com.br/site/produtos/pdf/PB313\\_web\\_baixa.pdf](http://www.mitutoyo.com.br/site/produtos/pdf/PB313_web_baixa.pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2015.

MOCELLIN, Fabiano. **AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR EM ENSAIOS DE FURAÇÃO.** 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE BROCAS NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR.** 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

OZBEK, I.; BINDAL, C. **Kinetics of borided AISI M2 high speed steel.** 2011. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/vacuum](http://www.elsevier.com/locate/vacuum)>. Acesso em: 14 fev. 2011.

PAULA, Tcharles Henrique de. **INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE E DO AVANÇO NA RUGOSIDADE PARA O TORNEAMENTO CILÍNDRICO DO FERRO FUNDIDO FE45012.** 2013. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Ifsc, Jaraguá do Sul, 2013.

PEREIRA, A. C. **Análise de capacidade para avaliar a influência de geometria de brocas helicoidais em furação profunda de uma liga de alumínio – Um estudo de caso.** 2010. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –

Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, Hélio Antônio da. **INFLUENCIA DO CICLO DE FURAÇÃO NA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO GH 190.2010**. 314 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

STEMMER, Caspar Erich. **FERRAMENTAS DE CORTE II: BROCAS, ALARGADORES, FERRAMENTAS DE ROSCAR, FRESAS, BROCHAS, REBOLOS, ABRASIVOS**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

TUPY S.A. (Joinville). **FUCO PERFIS FUNDIDOS**. Disponível em: <[http://www.tupy.com.br/imagens/perfil\\_catalogos/fuco\\_cat\\_tec.pdf](http://www.tupy.com.br/imagens/perfil_catalogos/fuco_cat_tec.pdf)>. Acesso em: 31 maio 2015.

VIEIRA, Jalon de Moraes et al. **INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA EMISSÃO ACÚSTICA E CORRENTE DO MOTOR NA FURAÇÃO**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. Anais. Águas de Lindóia: Cobem, 1999. p. 1 - 10.

WOSNIAK, Fabio Augusto; POLLI, Milton Luiz; CAMARGO, Paulo André de. **INFLUENCIADOS PARAMETROS DE CORTE NA FURAÇÃO PROFUNDADO AÇO SAE 4144**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. Comprometida com a promoção do desenvolvimento da engenharia e das ciências mecânicas. Belo Horizonte: Abcm, 2009. p. 1 - 10.