

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA BROCA DE METAL-DURO NA QUALIDADE
DO FURO REALIZADO EM FERRO FUNDIDO NODULAR

por

Mateus Trindade Figueiredo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2015.

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA BROCA DE METAL-DURO NA QUALIDADE
DO FURO REALIZADO EM FERRO FUNDIDO NODULAR**

por

Mateus Trindade Figueiredo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Esp. Bruno Santana Sória

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 12 de junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. André João de Souza, pela dedicação e apoio prestados na elaboração deste trabalho de conclusão, ao mestrando Bruno Santana Sória e aos demais integrantes do Laboratório de Automação em Usinagem da UFRGS que tornou este possível.

Ao Prof. Dr. Dilson José Aguiar de Souza e ao Guilherme Luis Procksch da Silveira do Laboratório de Metrologia da UNISINOS pela disponibilidade.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo ao estudo, suporte e compreensão durante a minha vida e especialmente na jornada estudantil dessa formação acadêmica.

Aos amigos e colegas, que me apoiaram e me acompanharam nas escolhas e caminhos tomados nesse período da minha vida.

À empresa Secta Tools, pelas brocas e pelos corpos de prova cedidos para os testes.

À empresa Bondmann Química, pela doação do fluido biolubrificante BD-Fluid B90.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo amplo conhecimento adquirido e por todas as experiências que guardarei como lembranças pra vida.

FIGUEIREDO, M. T. **Estudo da influência da geometria da broca de metal-duro na qualidade do furo realizado em ferro fundido nodular**. 2015. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Propõe-se uma avaliação comparativa dos resultados obtidos no processo de furação de corpos de prova de ferro fundido nodular DIN GGG50 para duas geometrias de brocas de metal-duro (canais helicoidais e canais retos) com diferentes afiações (padrões e modificadas) utilizando três diferentes velocidades de corte e quatro avanços por volta distintos (valores estes limitados pela capacidade operacional da máquina-ferramenta). Essa avaliação se dará a partir da medição das parcelas dinâmicas dos esforços cortantes (força de avanço e momento torçor), do erro de batimento na fixação das brocas, dos perfis de rugosidade das paredes dos furos e desvio geométrico de circularidade dos furos. Além disso, procuraram-se correlações entre os resultados dos esforços e qualidade superficial e geométrica. Os resultados mostraram que a broca de canal helicoidal com geometria detalonada gerou os menores esforços médios, enquanto a de canal reto com geometria facetada gerou melhor qualidade nos furos, com baixos valores de rugosidade e de desvio geométrico. Também foi encontrada uma correlação entre a variação dos esforços cortantes e qualidade dos furos gerados.

PALAVRAS-CHAVE: broca de metal-duro, ferro fundido, rugosidade, desvio de circularidade.

FIGUEIREDO, M. T. **Study of the influence of solid carbide drill geometry in the quality of hole generated by nodular cast iron drilling**. 2015. 24 fls. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This work intends a comparative evaluation of the results obtained in the nodular cast iron DIN GGG50 drilling process making use of two geometries of carbide drills (helical and straight flutes) with different edgings (standard and modified) using three different cutting speeds and four distinct feed rates was used (these values are limited by the operational capability of the machine tool). This assessment was made from the measurement of the dynamic portions of the shear forces (axial force and torque), the error rate when fixing the drills, the surface roughness of the walls of the holes and the geometric deviation of circularity of the holes. Furthermore, correlations were sought between the results of shear forces and geometric and surface quality. The results showed that the helical drill with cone relief point geometry yielded the lowest average shear forces, while the straight flute drill with faceted geometry produced a better quality holes with low surface roughness and geometric deviation. Also, a relationship between the variation of cutting forces and quality of the generated holes was found.

KEYWORDS: carbide drill, cast iron, roughness, circularity deviation.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 2 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 3.1 Furação..... | 2 |
| 3.2 Brocas | 2 |
| 3.3. Esforços Cortantes na Furação..... | 3 |
| 3.4. Ferro Fundido Nodular | 4 |
| 3.5. Qualidade na Furação..... | 4 |
| 4. METODOLOGIA | 5 |
| 4.1. Montagem e Realização dos Ensaios de Furação | 5 |
| 4.2. Medição de Rugosidade | 8 |
| 4.3. Obtenção dos Desvios de Circularidade | 8 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 9 |
| 5.1. Avaliação dos Esforços..... | 9 |
| 5.2. Avaliação da Rugosidade da Parede do Furo | 11 |
| 5.3. Avaliação dos Desvios de Circularidade dos Furos..... | 12 |
| 5.4. Correlações entre Esforços Cortantes e Qualidade | 12 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 13 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 14 |
| APÊNDICES | 16 |
| I – Avaliação dos Erros de Batimento na Fixação de Cada Broca | 16 |
| II – Variações dos Esforços de Corte..... | 16 |
| III – Análise das Ondulações Secundárias na Superfície Usinada | 17 |
| ANEXO | 18 |

1. INTRODUÇÃO

A furação é um dos processos de fabricação por usinagem mais utilizados na indústria, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metais (Castillo, 2005). Por isso é de extrema importância escolher a ferramenta de corte levando-se em conta o material da peça usinada e os parâmetros de corte. Assim como para processos de torneamento e fresamento, a introdução de novos materiais nas ferramentas de furação, como o metal-duro, vem sendo cada vez mais intenso (Rombaldi, 2011).

O uso de ferro fundido nodular tem sido cada vez maior como material estrutural, pois ele é superior a outros tipos de ferros fundidos, apresentando boa resistência à abrasão, capacidade de amortecimento, resistência a variações de temperatura, economia e usinabilidade. O ferro fundido nodular é amplamente usado em blocos de motor, cabeçotes, bielas, anéis de pistão de freio e demais peças automotivas (Costa, 2008). O ferro fundido nodular tem melhor usinabilidade comparado com alguns aços ou até mesmo outras classes de ferros fundidos. Isso se deve à presença dos nódulos de grafita na sua microestrutura que atuam como quebra cavacos, aumentando a lubrificação entre a ferramenta de corte e a peça usinada (Marques, 2012).

No trabalho desenvolvido por Marques, 2008, avalia-se o desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas na furação de ferro fundido nodular. Foram testados dois diferentes revestimentos, analisando o desgaste da ferramenta, variando-se a velocidade de corte e o avanço. Verificou-se que os revestimentos aumentaram significativamente a resistência das brocas ao desgaste por abrasão.

Dentre os materiais de broca existentes na indústria, a escolha pelo metal-duro se explica pelo alto nível de dureza associado à resistência ao desgaste e à quente, mantendo a tenacidade em níveis perfeitamente aceitáveis. Porém, essa superioridade implica em custos bem mais elevados (Massirer Jr., 2010).

A fim de melhorar o desempenho de uma broca de metal-duro, é comum usar revestimentos para aumentar a resistência ao desgaste, por exemplo. Nos últimos anos, novos estudos a respeito vêm sendo desenvolvidos. É o caso dos produtos da Balzers[®]. Essa empresa desenvolveu o revestimento Balinit-Helica[®], utilizado para melhorar a vida de ferramentas de furação, visto que ela suporta velocidades de corte mais elevadas, facilita ainda mais a extração de cavaco e melhora a qualidade dos furos (Balzers, 2006).

Segundo Almeida, 2008, um exemplo importante do uso da furação na indústria é a produção de um bloco de motor, que requer processos posteriores, como o alargamento. Essa aplicação requer qualidade superficial, precisão de forma e dimensional. O autor investigou a influência da geometria de alargadores, dos parâmetros de usinagem e de revestimentos da ferramenta sobre os desvios geométricos de furos obtidos. Cita que o melhor revestimento para alargar ferro fundido cinzento é o Helica[®], mesmo revestimento utilizado no presente trabalho. Por fim chegou à conclusão que a diminuição da velocidade de corte e o aumento do avanço por volta geraram melhor qualidade nos furos obtidos.

Na dissertação produzida por Castillo, 2005, abordou-se a aplicação de furação profunda, que é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional devido às condições críticas de usinagem em que se realiza. A dificuldade se dá principalmente pela remoção de cavaco, que influencia diretamente na qualidade da superfície e nas tolerâncias geométricas e de forma do furo. O material analisado foi o ferro fundido cinzento DIN GG25, utilizando brocas de canais retos. Foram feitas medições de rugosidade, cilindridade e circularidade dos furos.

Visto a importância de se avaliar a qualidade na sua usinagem, podem ser realizados ensaios de furação, com o objetivo de correlacionar o uso de brocas de alto desempenho com os esforços cortantes gerados, a rugosidade das paredes dos furos usinados e os seus desvios geométricos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho objetiva estudar a influência das diferentes microgeometrias de cinco brocas de metal-duro na qualidade de furos realizados através de processo de furação em ferro fundido nodular DIN GGG50.

Para cada uma das brocas serão testados diferentes parâmetros de usinagem. A avaliação da qualidade se dará pela medição das parcelas dinâmicas dos esforços cortantes (força de avanço e momento torçor), dos perfis de rugosidade das paredes dos furos e seus desvios de circularidade.

Espera-se quantificar a vibração resultante da combinação dos diferentes parâmetros de entrada (máquina operatriz, material da peça, geometrias das brocas e parâmetros de corte) através da variação da amplitude dos esforços cortantes e correlacionar os dados obtidos com a qualidade superficial e geométrica do furo realizado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Furação

A furação é definida pela norma DIN 8589 como um processo de usinagem com movimento de corte circular (movimento rotativo principal). A ferramenta (broca) possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, mantendo sua posição em relação à ferramenta e à peça (Marques, 2008). Pelo fato de a maioria das peças produzidas na indústria possuírem pelo menos um furo, o processo é um dos mais utilizados (Smith, 2008).

O processo de furação é realizado em condições relativamente severas, dentre as quais podem ser citadas (Castillo, 2005):

- a velocidade de corte não é uniforme, variando de zero (centro do furo) até um valor máximo (periferia da broca);
- o processo de geração de cavaco é de difícil observação;
- o fluido de corte, que deve atuar como refrigerante, lubrificante e meio de transporte de cavacos, chega com dificuldade à aresta de corte da ferramenta, onde é mais necessário;
- há uma distribuição inadequada de calor na região de corte e ocorre atrito e desgaste pronunciado nas quinias com cantos vivos.

3.2 Brocas

Com a evidente importância da furação na indústria, as brocas passam a ser fonte de muitos estudos e desenvolvimento. Elas podem ser diferenciadas pela geometria dos canais de escoamento do cavaco. Para um melhor entendimento, devem-se analisar as características geométricas principais de uma broca.

As brocas de canais helicoidais são projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. Podem ser classificadas de acordo com o tipo de material do qual são fabricadas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e afiação da ponta. As brocas de canais retos também são projetadas para furação em cheio e caracterizam-se por uma boa resistência à torção. As brocas de canais retos são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo GG, GGG e ligas de alumínio AlSi, sendo seu uso limitado a furos de 15D de comprimento (Castillo, 2005; Stemmer, 2001; Gühring, 1997).

O desempenho das brocas é afetado diretamente por sua geometria. Ela apresenta duas arestas de corte constituídas pelas cunhas de corte, formadas pela intersecção das superfícies de saída e folga e pela aresta transversal de corte. Os elementos geométricos de uma broca helicoidal podem ser vistos na Figura 3.1.

O ângulo de hélice da broca define o ângulo de saída, apresentando o seu valor máximo na ponta de corte e diminuindo no sentido do centro desta, tornando-se negativo na passagem para a aresta transversal (Souza *et al.*, 2014). Os ângulos das brocas de canais retos e helicoidais podem ser vistos na Figura 3.2.

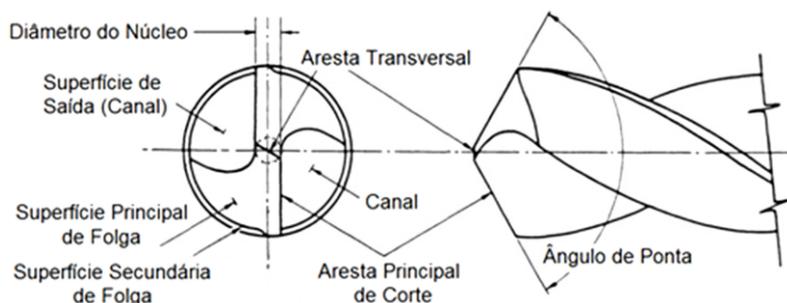


Figura 3.1: Elementos geométricos de uma broca helicoidal (adaptado de Diniz *et al.*, 2008).

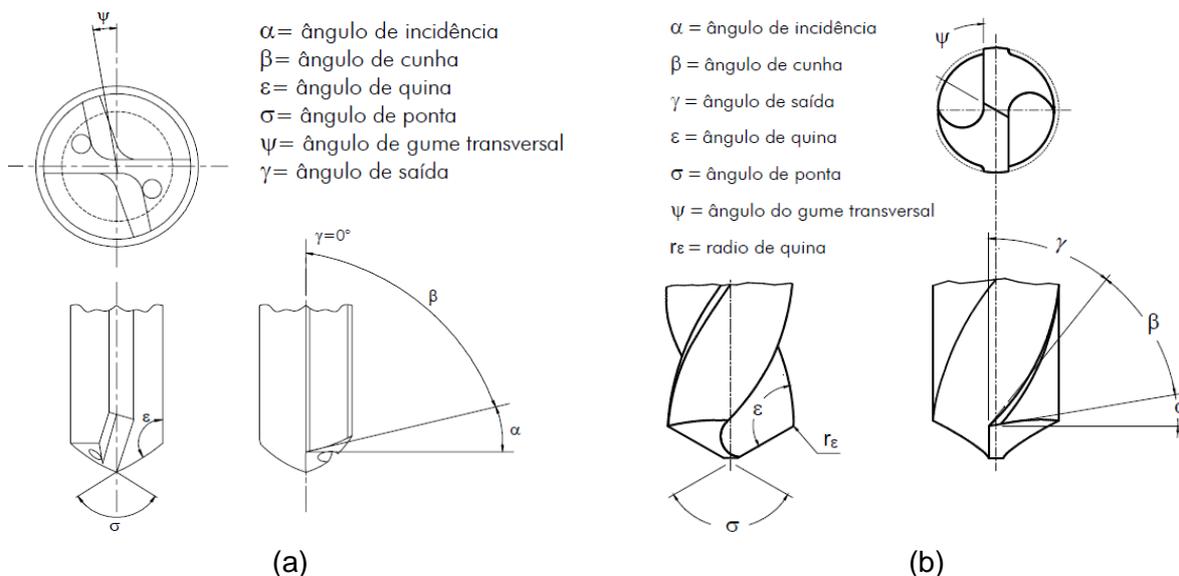


Figura 3.2: Ângulos de corte das brocas de: (a) canais retos (Schroeter, 2003); (b) canais helicoidais (Schroeter, 1999).

As brocas podem ser classificadas quanto ao material. Dentre as classes existentes, podem-se citar: cerâmicas, aço-rápido e metal-duro. A escolha pela broca de metal-duro se explica pelo alto nível de dureza associado à resistência ao desgaste e a quente, mantendo a tenacidade em níveis perfeitamente aceitáveis. Porém, esta superioridade implica em custos bem mais elevados. Por exemplo, para justificar a sua utilização, faz-se necessário utilizar máquinas-ferramentas que permitam alcançar os níveis de velocidade, potência e rigidez exigidos por essa ferramenta (Massirer Jr., 2010).

A fim de melhorar o desempenho de uma broca de metal-duro, é importante usar revestimentos para aumentar a resistência ao desgaste, facilitar a extração de cavaco e melhorar a qualidade dos furos. É o caso dos produtos da Balzers, que desenvolveu o revestimento Balinit Helica (Balzers, 2006). Essa tecnologia está presente nas cinco brocas da Secta Tools usadas neste trabalho (Secta, 2015).

3.3. Esforços Cortantes na Furação

O estudo das forças atuantes na usinagem é de fundamental importância, pois estas afetam a potência de corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. O esforço cortante é a resistência à penetração da ferramenta durante os movimentos de corte.

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 a força de avanço (Souza *et al.*, 2014).

A Figura 3.3 apresenta as decomposições das forças de usinagem na broca durante o processo de furação. A força de usinagem F é a resultante das forças de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f) geradas pela reação aos movimentos de rotação da ferramenta e de avanço.

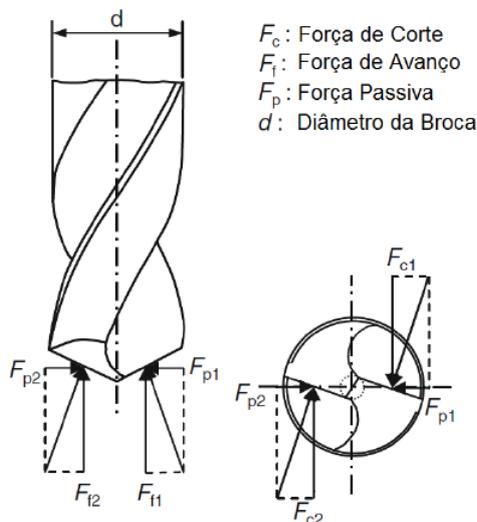


Figura 3.3: Atuação das forças de corte em uma broca (adaptado de Klocke, 2011).

3.4. Ferro Fundido Nodular

Segundo Almeida, 2008, os ferros fundidos podem ser definidos como ligas ferro-carbono, apresentando teor de carbono entre 1,8 e 4,5%, ponto de fusão relativamente baixo, em torno de 1200°C, e menor custo de produção, quando comparados aos aços. Graças à evolução dos processos de obtenção e dos meios de controle, as peças produzidas por fundição apresentam propriedades cada vez melhores, ampliando o campo de aplicação e viabilizando a sua utilização em setores antes exclusivos dos aços com médio teor de carbono.

Como mostrado por Chiaverini, 1988, os ferros fundidos são divididos em 6 classes diferentes de acordo com suas microestruturas: cinzento, branco, mesclado, maleável, nodular e vermicular. Dados mais completos de comparação entre os ferros fundidos nodulares, cinzentos e maleáveis podem ser vistos na Figura B (ANEXO).

O ferro fundido nodular apresenta carbono livre na forma de grafita esferoidal. A principal propriedade deste material é a sua ductilidade (Callister *et al.*, 2002).

O ferro fundido nodular DIN GGG 50 é obtido a partir de adição de pequena quantidade de Mg ou Ce no ferro fundido de alto carbono em estado líquido. Desse modo grafita é produzida de modo a reduzir o efeito de alguns agentes que interferem no processo de nodulação, tais como Ti, Pb, Bi e As. Assim a estrutura resultante é uma matriz perlítica com grafita esferoidal (Chiaverini, 2008).

O GGG 50 apresenta maior resistência mecânica, tenacidade e ductilidade que o cinzento, devido a morfologia da grafita esferoidal (Souza *et al.*, 2014).

A boa usinabilidade do ferro fundido nodular se deve principalmente à presença da grafita na sua microestrutura, o que facilita a quebra de cavaco, ajudando assim a expulsão dos resíduos do material. Ele pode ser aplicado em blocos de motores, virabrequins, tubulações, coletores de escapamento, discos de embreagem, carcaças de diferencial, entre outros componentes automotivos (Chiaverini, 2008).

3.5. Qualidade na Furação

A qualidade de uma usinagem é influenciada por diversos fatores, sendo eles sistemáticos ou aleatórios (Klocke, 2011). Dois importantes tipos a serem analisados e quantificados num processo de furação são os desvios geométricos e a qualidade superficial dos furos realizados.

Na fabricação de peças, as superfícies apresentam micro ondulações e irregularidades. A rugosidade da superfície é um conjunto dessas irregularidades finas, resultantes da ação inerente do processo de corte. A altura ou profundidade isolada das irregularidades é medida em um pequeno comprimento de amostragem, denominado *cut-off* (Fonseca *et al.*, 2010).

A rugosidade média R_a é a média aritmética das distâncias absolutas do perfil real ao perfil médio, detalhado na Figura 3.4a. Já a rugosidade total R_t é distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição, detalhado na Figura 3.4b (Almeida, 2008). O acabamento dos furos depende, dentre outros fatores, da dureza das peças de trabalho, das condições das arestas de corte, do avanço e da velocidade de corte (Fonseca *et al.*, 2010).

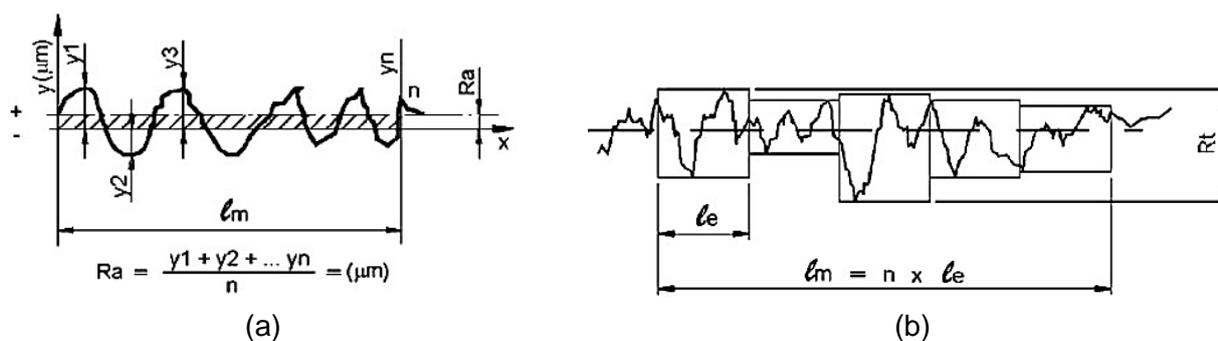


Figura 3.4: Detalhamento das rugosidades (Almeida, 2008): (a) rugosidade média R_a ; (b) rugosidade total R_t .

Os desvios geométricos são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem. Os desvios podem ser classificados em: retilidade, circularidade, cilindridade, conicidade, planicidade etc. (Fonseca *et al.*, 2010). Na furação, os principais são os de circularidade, cilindridade e concentricidade (Almeida, 2008).

Os desvios de circularidade são de extrema importância na indústria de precisão. Um erro de circularidade é medido através da circunscrição do mesmo em um círculo básico, onde a área interna, formada pelas linhas do furo real e do círculo básico, é igual à área externa formada pelas mesmas linhas. Com base na Figura 3.5, se diz que seu valor é a máxima diferença entre o raio maior R e o raio menor r (Bezerra, 1998).

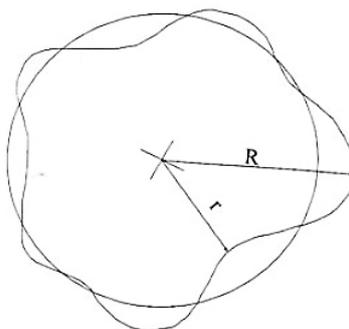


Figura 3.5: Erro de circularidade (Bezerra, 1998).

4. METODOLOGIA

4.1. Montagem e Realização dos Ensaio de Furação

A fim de avaliar a qualidade dos furos foram utilizados como corpos de prova três blocos de ferro fundido nodular DIN GGG50 com dimensões de 100 x 100 x 50 mm. Cada corpo de prova foi esquadrejado para garantir o paralelismo de suas faces.

Com o objetivo de facilitar a programação da máquina-ferramenta, as posições dos furos foram numeradas previamente, conforme Figura 4.1, para serem posteriormente correlacionadas com os diferentes parâmetros de corte, segundo Tabela 4.1.

Anteriormente a cada ensaio, foram feitos furos de centro nas posições prévias dos furos (Fig. 4.2a) para facilitar a penetração da ferramenta de corte no material e guiá-la, evitando escorregamentos na entrada da broca.

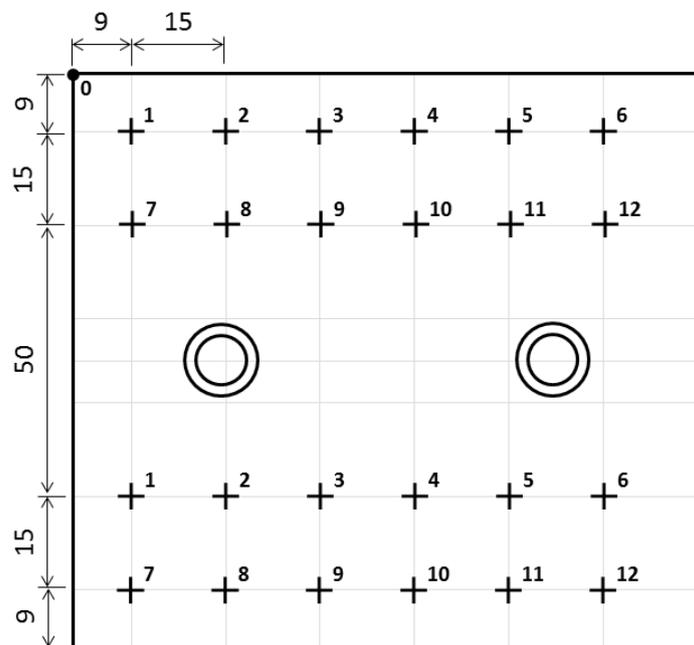
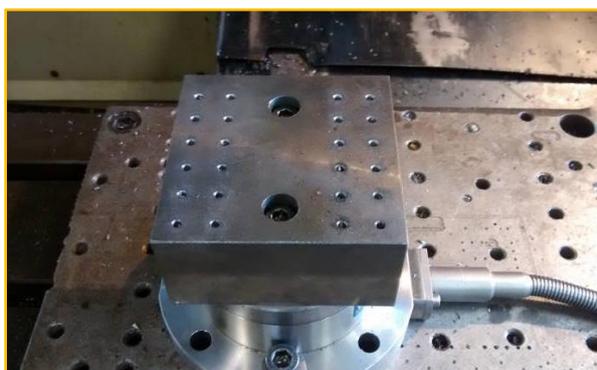


Figura 4.1: Posições numeradas dos furos para cada broca, para as duas amostras.

Tabela 4.1: Parâmetros de corte de furação para cada furo.

| Furo Nº | v_c [m/min] | n [rpm] | f [mm/volta] | v_f [mm/min] |
|---------|---------------|-----------|----------------|----------------|
| 1 | 100 | 2653 | 0,29 | 769 |
| 2 | 125 | 3316 | 0,29 | 962 |
| 3 | 150 | 3979 | 0,29 | 1154 |
| 4 | 100 | 2653 | 0,35 | 928 |
| 5 | 125 | 3316 | 0,35 | 1161 |
| 6 | 150 | 3979 | 0,35 | 1393 |
| 7 | 100 | 2653 | 0,41 | 1088 |
| 8 | 125 | 3316 | 0,41 | 1359 |
| 9 | 150 | 3979 | 0,41 | 1631 |
| 10 | 100 | 2653 | 0,47 | 1247 |
| 11 | 125 | 3316 | 0,47 | 1558 |
| 12 | 150 | 3979 | 0,47 | 1870 |

O corpo de prova correspondente foi fixado em uma plataforma piezelétrica Kistler 9272 com o objetivo de adquirir a força de avanço (F_f) e o momento Torçor (M_t) (Fig. 4.2a). Essa plataforma piezelétrica foi conectada a um condicionador de sinais Kistler 5070A10100 que, por sua vez, foi conectada a um computador para o tratamento e a análise dos sinais obtidos via software LabVIEW 8.6 (Fig. 4.2b). A aquisição dos sinais foi feita a uma taxa de 2000 pontos por segundo. A análise e o tratamento dos dados foram feitos utilizando o software MS Excel.



(a)



(b)

Figura 4.2: (a) Furos de centro feitos nas posições indicadas do corpo de prova fixado na plataforma piezolétrica; (b) Condicionador de sinais e computador usados no ensaio.

Durante a furação, os esforços F_f e M_t oscilam em torno de um valor médio. Esta oscilação indica a vibração no processo. Assim, calculou-se a média aritmética e a repetibilidade (Re) dos valores obtidos durante a geração dos furos. Para correlacionar M_t com a qualidade do furo, calculou-se a variação do momento torçor ($\Delta M_t = Re$), Equação (4.1):

$$Re = \pm t \cdot s \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad (4.1)$$

onde “s” é o desvio-padrão da amostra de aproximadamente 1000 pontos coletados e “t” é o coeficiente t-Student. No caso, considerou-se $t = 1,96$ (95% de confiança).

Foram usadas cinco brocas de metal-duro com revestimento à base de AlCrN (Balinit Helica) e diâmetro $D = 12$ mm com diferentes microgeometrias (Secta, 2015): três com canais helicoidais – uma padrão (B1) e duas modificadas (B2 e B3) e duas com canais retos – uma padrão (B4) e uma modificada (B5), Fig. 4.3.

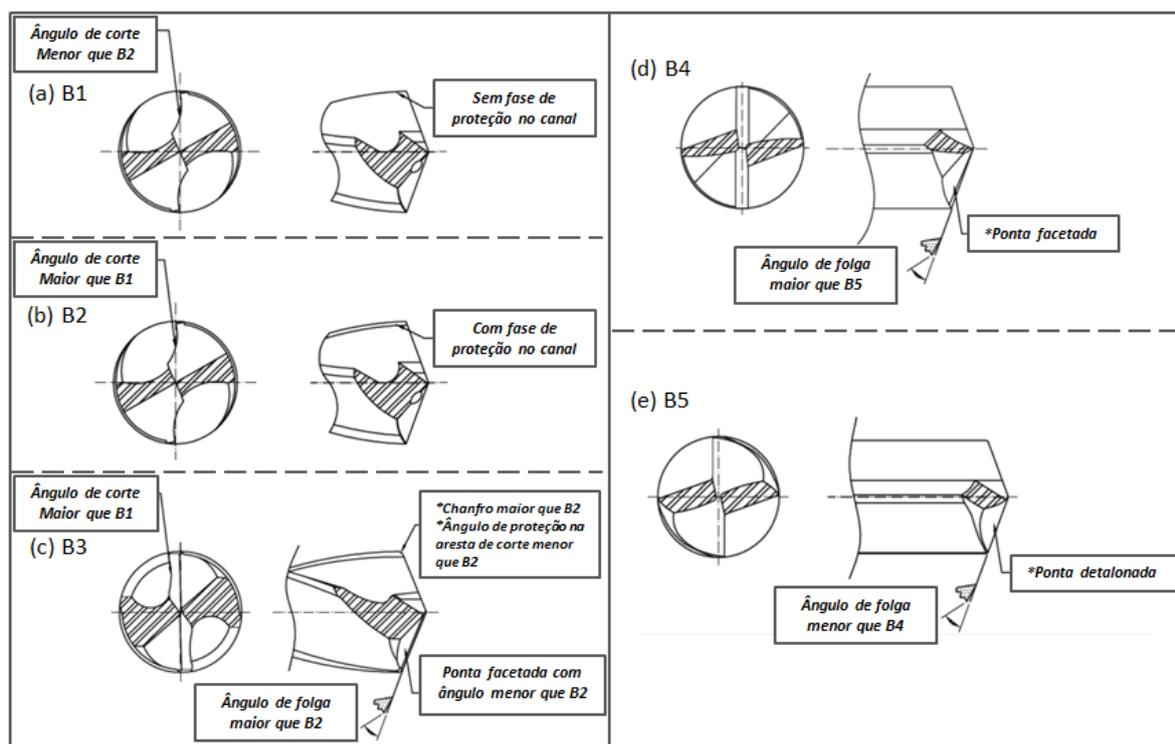


Figura 4.3: Caracterização das brocas: (a) helicoidal com ponta detalonada (padrão); (b) helicoidal com ponta detalonada (modificada); (c) helicoidal com ponta facetada; (d) reta com ponta facetada (padrão); (e) reta com ponta detalonada (adaptado de Souza *et al.*, 2014).

Para cada broca foram usadas combinações de três velocidades de corte (v_c) [m/min] e quatro avanços (f) [mm/volta], resultando em 12 furos por amostra. O ensaio teve uma repetição, resultando em um total de 24 furos por broca (duas amostras). A profundidade dos furos foi mantida em $2 \cdot D = 24$ mm (recomenda-se até $2,5 \cdot D$). Essa profundidade garantiu que cada corpo de prova pudesse ser furado nos dois lados de maior área (100×100 mm), restando 2 mm de folga entre furos coaxiais opostos, visto a espessura do bloco (50 mm). Assim, cada bloco pôde servir como corpo de prova para experimento de duas brocas, com os vinte e quatro furos de cada uma em cada lado do bloco, mantendo sempre a mesma ordem dos furos. Isto explica porque foram usados apenas três blocos para as cinco brocas experimentadas.

Os ensaios foram feitos no centro de usinagem Romi modelo Discovery 308 presente no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-DEMEC-UFRGS) utilizando o fluido biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 em abundância (vazão = 22 l/min). A Figura 4.4a mostra a máquina-ferramenta sendo preparada para o experimento.

Também foi verificado o erro de batimento na fixação de cada broca (vide APÊNDICE I).

4.2. Medição de Rugosidade

Para análise da qualidade superficial da usinagem, foram feitas medidas de rugosidade nas paredes dos furos com rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P. Nas medições usou-se um comprimento de amostragem $\lambda = 0,8$ mm para um comprimento de medição $5 \cdot \lambda = 4$ mm. A Figura 4.4b mostra como as medidas foram obtidas.

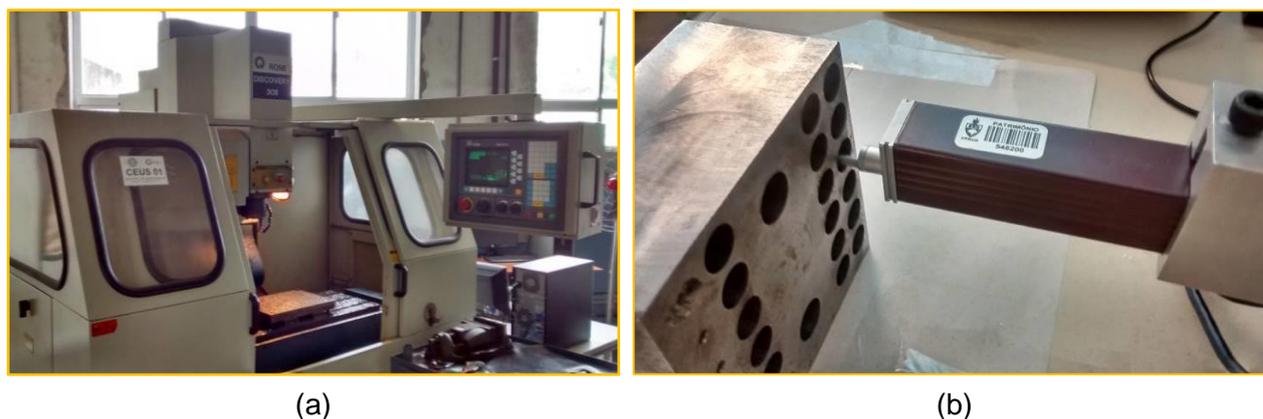


Figura 4.4: (a) Centro de Usinagem Romi Discovery 308; (b) Medição de rugosidade com rugosímetro portátil SJ-201P.

4.3. Obtenção dos Desvios de Circularidade

Com o objetivo de quantificar a qualidade geométrica dos furos, foram medidos os desvios de circularidade. Para isso, primeiramente foram medidos os erros de forma com uma máquina de medição por coordenadas tridimensional (MMC) Starrett modelo Galileon AV 300+, com precisão de $1,9 \mu\text{m}$, do Laboratório de Metrologia da UNISINOS. Usou-se uma tolerância superior de $0,2$ mm. Para cada furo mediu-se primeiro o plano ao redor do mesmo usando 4 pontos, e a seguir mediu-se 10 pontos, radialmente espaçados, na borda deste furo (Fig. 4.5a).

Posteriormente, achou-se necessário medir também o real diâmetro de cada furo usinado, para posteriormente somar o erro já conhecido com a diferença do nominal para o medido. Utilizou-se uma MMC Mitutoyo modelo QM-Measure 353, com precisão de $3 \mu\text{m}$, do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-DEMEC-UFRGS), Figura 4.5b.

O cálculo sugerido para definir os desvios é dado pela Equação (4.2):

$$d = e + |D_n + D_m| \quad (4.2)$$

onde:

d = desvio de circularidade [μm] requerido;

e = erro de circularidade [μm] calculado pela MMC Starrett;

D_n = diâmetro nominal da broca [μm]

D_m = diâmetro medido de cada furo [μm] calculado com a MMC Mitutoyo.

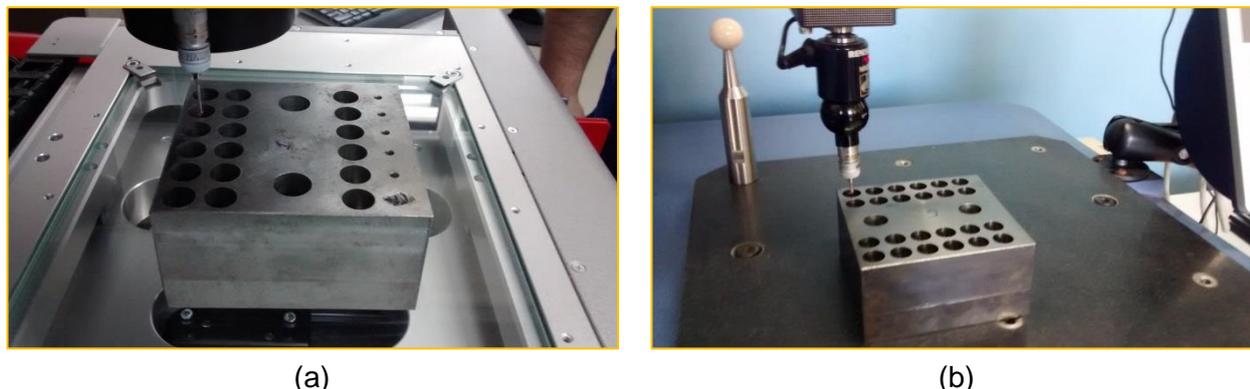


Figura 4.5: Máquinas de medição por coordenadas: (a) Starrett no laboratório de metrologia da UNISINOS; (b) Mitutoyo no LAUS-UFRGS.

O erro de circularidade “ e ” (vide Fig. 3.5) é definido como a diferença entre o maior e o menor raio. Porém, no caso apresentado, o erro dado pela máquina na medição já indica a diferença dos diâmetros. Sendo assim, na Equação (4.2), não é preciso multiplicar o erro por 2.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de furação, foi possível avaliar os erros de batimento na fixação de cada broca, os esforços cortantes (momento torçor e força de avanço), as rugosidades das paredes de todos os 120 furos usinados e seus desvios de circularidade. Isso produziu um total de 485 dados a serem tratados, gerando tabelas e gráficos para melhor compreender a influência da microgeometria das brocas e dos parâmetros de corte na qualidade de cada furo.

A seguir são apresentadas as avaliações, separadas por tipos de medição, e ao final as correlações entre os esforços e a qualidade dos furos.

5.1. Avaliação dos Esforços

Uma análise dos dados de força de avanço (F_f) e momento torçor (M_t) mostra uma tendência já esperada conforme estudo prévio segundo Souza et al. (2014). Assim, desenvolvendo essa análise, pode-se chegar a resultados que possibilitem correlacioná-los com a qualidade dos furos.

Ao tratar os dados de M_t , pode-se gerar um gráfico dos valores por furo para cada uma das cinco brocas, como pode ser visto na Figura 5.1.

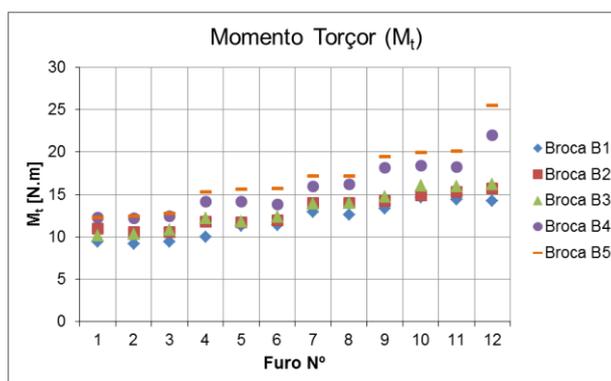


Figura 5.1: Momentos de torção gerados nos ensaios de furação.

Tendo em vista que durante a furação os valores dos esforços oscilam em torno de uma média, indicando a vibração no processo, calculou-se a média aritmética dos sinais obtidos durante a geração dos furos.

Uma primeira análise da Figura 5.1 permite dizer que, considerando as combinações utilizadas de parâmetros por furo (vide Tab. 4.1), o avanço f é o que mais influencia nos esforços de corte. Como já era esperado, o aumento deste parâmetro influencia o aumento do momento torçor, o que não acontece com a velocidade de corte, a qual não influencia significativamente. Nota-se também que as brocas de canais retos (B4 e B5) geraram os maiores valores em comparação com as de canais helicoidais (B1, B2 e B3). Quando se comparam as brocas de canais retos entre si, percebe-se que a B5 apresenta valores de momento torçor maiores que a B4. Isso mostra que a ponta detalonada aumenta os esforços torcionais quando comparada com a ponta facetada. Como era de se esperar, o Furo 12, que combina alta velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) e alto avanço ($f = 0,47$ mm/volta) gerou valores de momento acima de 20 N·m para as brocas de canais retos.

Para analisar F_f foram gerados gráficos semelhantes ao de momento torçor. Os resultados foram divididos pelo tipo de canal das ferramentas, para uma melhor visualização: brocas com canais helicoidais (Fig. 5.2a) e com canais retos (Fig. 5.2b).

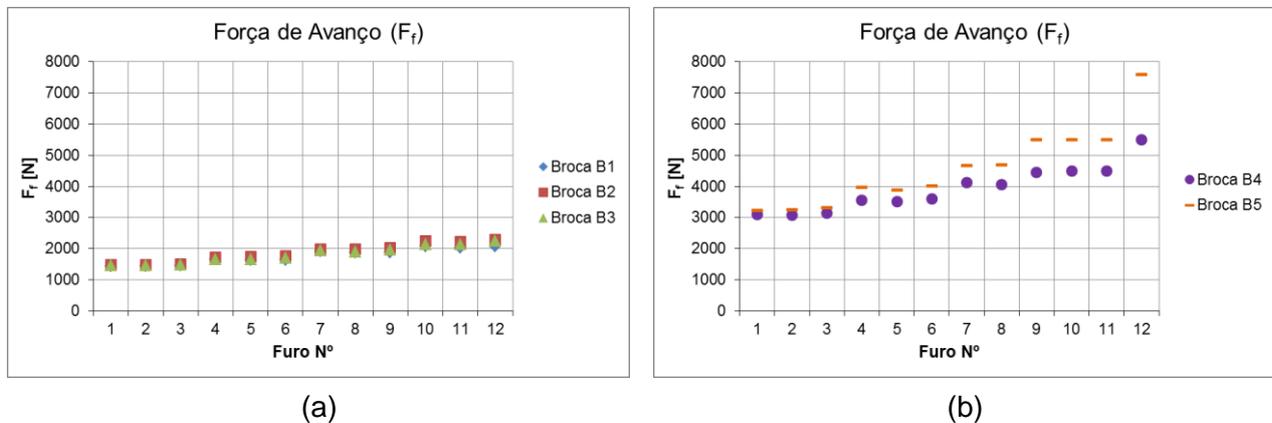


Figura 5.2: Forças de avanço geradas nos ensaios de furação: (a) utilizando brocas helicoidais; (b) utilizando brocas retas.

Percebe-se claramente na Figura 5.2a o aumento dos esforços juntamente com o avanço para as brocas helicoidais. A broca B2 (detalonada modificada) gerou forças de avanço ligeiramente superiores às outras duas apresentadas no gráfico, evidenciadas nos furos com maiores valores de avanço. A broca B3 (facetada) apresentou uma pequena superioridade nos valores em comparação à B1 (detalonada padrão), evidenciada nos últimos três furos.

Na Figura 5.2b nota-se primeiramente o aumento considerável dos valores obtidos com as brocas de canais retos em comparação às de canais helicoidais. Pode-se dizer que as forças geradas duplicaram, na média. A broca B5 (detalonada) apresenta valores maiores de força de avanço que a B4 (facetada). A diferença aumenta proporcionalmente com o aumento do avanço. Observa-se também que a força de avanço não varia significativamente com o aumento da velocidade de corte.

O Furo 12 ($v_c = 150$ m/min; $f = 0,47$ mm/volta) apresentou valores que escaparam da linha de tendência. A combinação dos parâmetros deste furo para a broca B5 pode ser considerada uma situação crítica, devido ao aumento exponencial de F_f e M_t durante a sua realização. (OBS. Durante o monitoramento da geração desse furo com a broca B5, foi verificado que houve saturação no sinal, com a força máxima ultrapassando o limite de 10 kN. Apesar disso, o furo foi realizado com sucesso).

Pode-se também verificar a variação dos esforços durante a produção dos furos. Como podem ser vistos no exemplo da Figura A2 (APÊNDICE II), os sinais obtidos de M_t e F_f apresentam suas particularidades (veja a Figura A2a).

5.2. Avaliação da Rugosidade da Parede do Furo

Após a medição das rugosidades nos furos, foi possível gerar gráficos a partir dos valores de rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t), comparando os resultados de cada broca para cada um dos doze furos (doze combinações de parâmetros).

Como foi feita uma repetição no ensaio para cada broca, calculou-se primeiro a média dos dois valores de rugosidades obtidos para cada combinação de parâmetro, identificada por F1, F2... F12. Em posse dessas médias, foi possível gerar os gráficos de R_a e R_t para cada conjunto de parâmetro de cada broca (Figuras 5.3a e 5.3b, respectivamente).

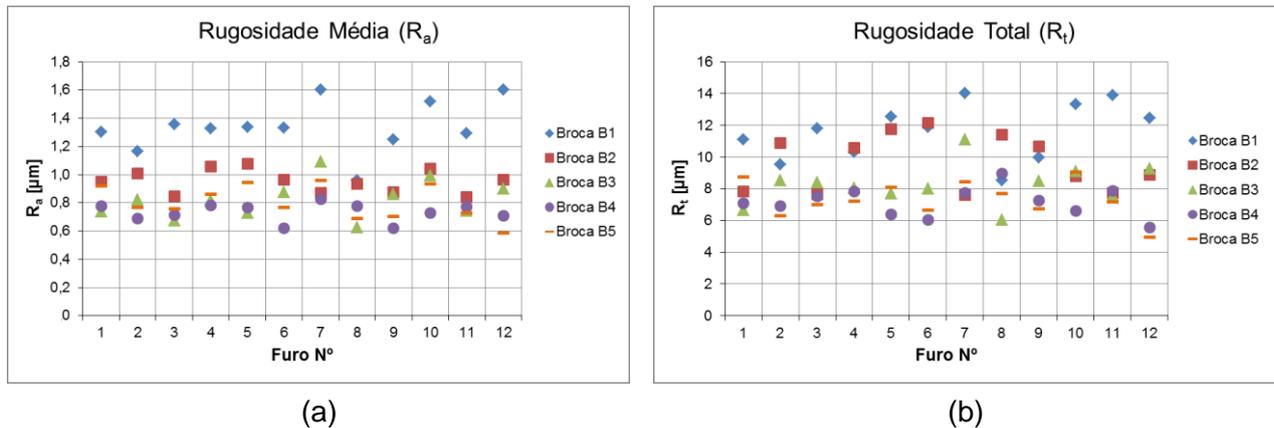


Figura 5.3: Rugosidades geradas nas paredes dos furos: (a) R_a ; (b) R_t .

Na Figura 5.3, nota-se primeiramente que a broca B1 (helicoidal detalonada padrão) obteve os maiores valores de rugosidade, seguido pela broca B2 (helicoidal detalonada modificada). Para as brocas B3 (helicoidal facetada), B4 (reta facetada padrão) e B5 (reta detalonada) é preciso analisar com mais cuidado os valores a fim de se chegar a uma conclusão. Para isso, as médias das rugosidades obtidas para cada broca foram calculadas. Assim pode-se gerar a Figura 5.4.

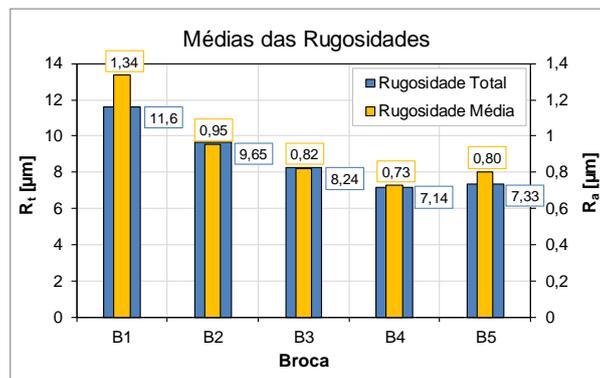


Figura 5.4: Gráfico da médias das rugosidades em todos os furos gerados por cada broca.

Percebe-se pela Figura 5.4 que a broca B4 (reta facetada) foi a que apresentou a melhor qualidade superficial (com $R_{a4} = 0,73 \mu\text{m}$ e $R_{t4} = 7,14 \mu\text{m}$), seguido da broca B5 (reta detalonada) com valores não muito maiores ($R_{a5} = 0,80 \mu\text{m}$; $R_{t5} = 7,33 \mu\text{m}$). Após se sucedem respectivamente as brocas B3, B2 e por fim B1.

Durante as análises dos perfis de rugosidade, notaram-se ondulações secundárias na medição de rugosidade, principalmente nas situações críticas (maiores avanços e velocidades de corte) em que foram utilizadas brocas helicoidais. Maiores detalhes podem ser conferidos no APÊNDICE III.

5.3. Avaliação dos Desvios de Circularidade dos Furos

Após as mensurações dos diâmetros medidos (D_m) e dos erros de circularidade (e), utilizou-se a Equação (4.2) para obter os desvios de circularidade (d) de cada furo. Com os resultados, foram gerados dois gráficos que podem ser vistos na Figura 5.5.

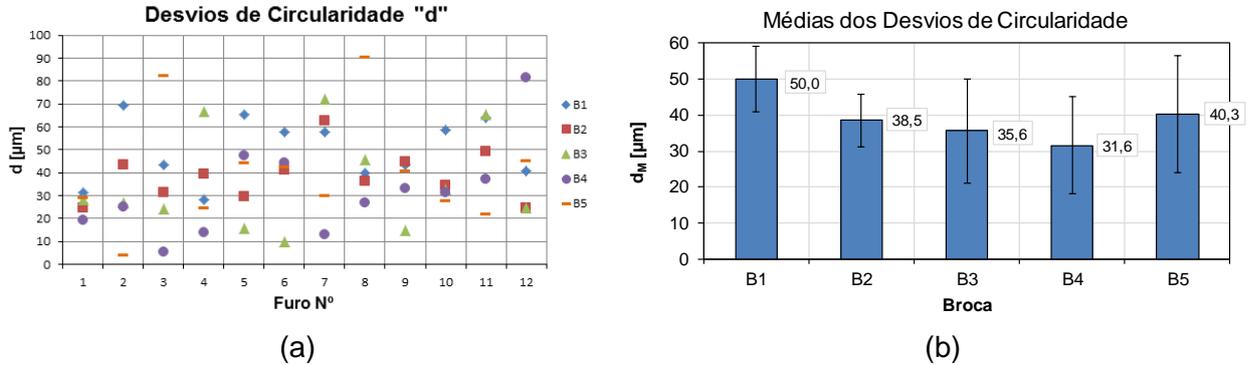


Figura 5.5: Gráficos dos desvios de circularidade: (a) em função do furo realizado para as diferentes brocas; (b) em função da broca (média dos desvios obtidos em cada furo).

A Figura 5.5a mostra os valores dos desvios (d) de todos os furos medidos. O que se percebe é a grande dispersão dos resultados, com exceção do Furo 1 ($v_c = 100$ m/min; $f = 0,29$ mm/volta), no qual todas as brocas apresentaram valores mais próximos. Isso se deve à menor solicitação imposta pelos parâmetros deste furo. Nele já se percebe que a broca B4 (reta facetada) apresentou o menor valor ($19,2 \mu\text{m}$) e a B1 (helicoidal detalonada padrão), o maior ($31,4 \mu\text{m}$), seguindo uma lógica semelhante dos resultados de rugosidade.

Para uma análise geral da qualidade gerada por cada broca, foi feito um segundo gráfico (Fig.5.5b), mostrando as médias dos desvios de circularidade dos furos (d_m) para cada uma das diferentes geometrias de ferramentas. Apesar da alta dispersão dos resultados, analisando as médias, pode-se dizer que o desempenho das brocas foi semelhante ao visto na análise da qualidade superficial pela rugosidade, com a broca reta facetada B4 apresentando a melhor qualidade geométrica ($31,6 \mu\text{m}$) e a helicoidal detalonada padrão B1 a pior ($50,0 \mu\text{m}$). A maior diferença foi na qualidade da broca reta detalonada B5 ($40,3 \mu\text{m}$) que dessa vez ficou atrás das brocas helicoidais modificadas B2 ($38,5 \mu\text{m}$) e B3 ($35,6 \mu\text{m}$).

5.4. Correlações entre Esforços Cortantes e Qualidade

Após analisar o desempenho das brocas quanto aos seus esforços de corte e qualidade dos furos, pode-se verificar se há alguma correlação entre esses resultados. Isso pode ajudar a melhor compreender as causas dos valores obtidos.

Como visto, as brocas de canais retos produziram valores maiores de esforços de corte e valores menores de rugosidade em relação às de canais helicoidais. Foi visto também que os esforços de corte crescem com o aumento do avanço. Porém, quando se analisam os valores de rugosidade, o mesmo não pode ser dito. Como mostrado na Figura 5.3, não fica claro que a rugosidade é afetada pelo avanço, conseqüentemente pela força de avanço (F_f). Mesmo quando inseridas curvas de tendência, não há uma conclusão sobre qual a influência desse parâmetro na qualidade superficial das paredes dos furos. Porém, já se sabe que segundo Fonseca *et al.*, 2010, o acabamento dos furos depende, dentre outros fatores, da dureza das peças de trabalho, das condições das arestas de corte, do avanço (f) e da velocidade de corte (v_c).

Visto isso, para tentar correlacionar esforços cortantes com a rugosidade, utilizaram-se as médias aritméticas dos momentos torçores (M_t) e da rugosidades médias (R_a) para cada broca em todos os furos. Assim, foi gerado o gráfico da Figura 5.6a. Observa-se que a qualidade superficial das paredes dos furos tende a melhorar com o aumento do momento torçor, mostrado pela relação inversamente proporcional de M_t e R_a .

Por outro lado, a variação da amplitude do momento torçor ($\Delta M_t = Re$) indica uma alteração da velocidade de corte (consequentemente, uma mudança da rotação da broca) e/ou uma modificação da força de corte (F_c). Isso pode alterar a geometria dos furos, isto é, os desvios de circularidade do furo podem ser alterados pelas oscilações da força de corte. Para comprovar isso, o gráfico da Figura 5.6b mostra a tendência semelhante entre os valores de ΔM_t e os desvios médios de circularidade (d_M), mostrando boa correlação entre eles. Os valores de ΔM_t foram calculados pela Equação (4.1).

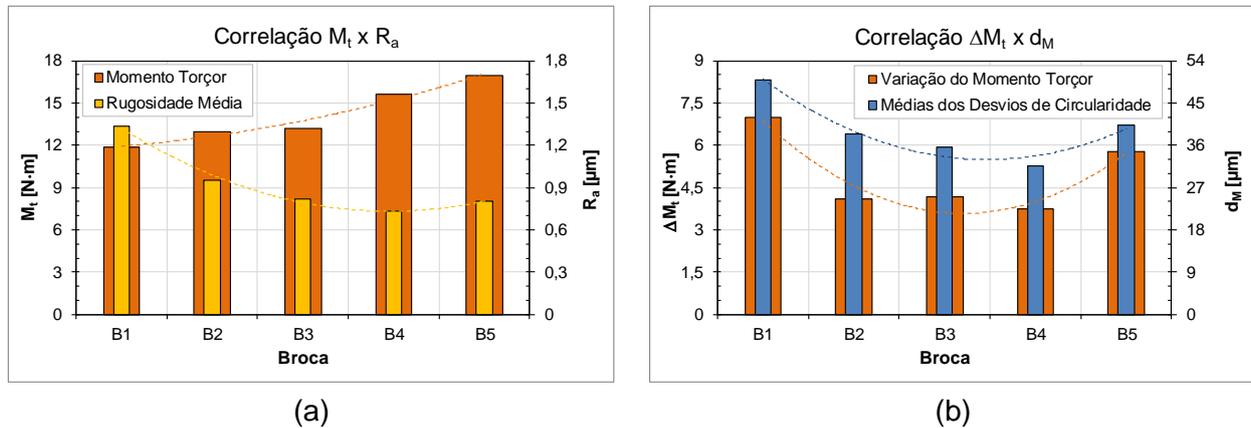


Figura 5.6a: Gráficos de correlação para as cinco brocas analisadas: (a) entre M_t e R_a ; (b) entre ΔM_t e d_M .

Comparando a rugosidade média dos furos (Fig. 5.4) com o erro de batimento (APÊNDICE I), nota-se uma tendência de aumento da rugosidade proporcional ao erro de batimento na fixação da ferramenta. O fato de a broca B3 (helicoidal facetada) apresentar o menor erro na fixação dentre todas não caracteriza que os furos gerados por ela devam apresentar os menores valores de rugosidade, visto que há o fator da diferença de geometria das ferramentas, principalmente entre canais retos e helicoidais. Assim, a qualidade dos furos nesse ensaio foi mais suscetível às diferentes formas das ferramentas que propriamente aos problemas na fixação delas.

6. CONCLUSÕES

Durante os ensaios de furação, foi possível comprovar a boa usinabilidade do ferro fundido nodular. A geração de cavacos pequenos, típico do ferro fundido, facilitou a remoção com o fluido de corte durante o processo de furação, como dito na literatura. Foi verificada também a importância de se revisar todos os dados de entrada na programação da máquina ferramenta, a fim de se evitar prejuízos, como a inutilização de uma ferramenta ou peça. O monitoramento dos esforços de corte em tempo real se mostrou preciso e coerente.

Dentre as brocas de canal helicoidal, a broca B3 (ponta facetada) apresentou a melhor qualidade superficial ($R_a = 0,82 \mu\text{m}$; $R_t = 8,24 \mu\text{m}$) e geométrica dos furos ($d_M = 35,6 \mu\text{m}$), com os resultados comparáveis à broca de canais retos B5 (ponta detalonada). Isso provavelmente se deve ao fato de que, além dela ter um ângulo de corte maior que o da broca helicoidal B1 (detalonada padrão), o ângulo de folga maior que o da broca helicoidal B2 (detalonada modificada) favorece a qualidade da usinagem. É uma boa alternativa para um trabalho de furação que requer uma boa qualidade superficial e que não possui potência suficiente para usar uma broca de canal reto. A broca B2 se mostrou uma intermediária entre a B1 e a B3 (helicoidal com ponta facetada) quanto à qualidade gerada.

A melhor qualidade superficial ($R_a = 0,73 \mu\text{m}$; $R_t = 7,14 \mu\text{m}$) e geométrica ($d_M = 31,6 \mu\text{m}$) dos furos foi obtida pela broca reta B4 (ponta facetada). Comparando primeiramente com a broca reta B5 (ponta detalonada), a primeira obteve melhor desempenho por apresentar um ângulo de folga maior, o que reduz o atrito entre a broca e a peça, e facilita a penetração da ferramenta. É a escolha certa para uma peça que requer alta qualidade. Com altos valores de

esforços gerados, as brocas com canais retos precisam de uma máquina-ferramenta mais potente que as brocas com canais helicoidais. O maior esforço ocorre devido ao ângulo de saída ser sempre negativo e, portanto, ter um ângulo de cunha grande.

A broca reta B5 (ponta detalonada) apresentou qualidade superficial ligeiramente menor e qualidade geométrica significativamente menor (ficando atrás até mesmo das brocas helicoidais modificadas B2 e B3). A broca B5 gerou altos esforços de corte, maiores que a B4, com a força de avanço ultrapassando 10 kN e o momento torçor em torno de 25,5 N·m na combinação de parâmetros mais crítica.

Foi possível verificar que os esforços cortantes (força de avanço F_f e momento torçor M_t) são diretamente proporcionais ao aumento do avanço (f) da ferramenta e não são significativamente influenciados pela variação da velocidade de corte (v_c). E por fim, foi verificada a tendência da variação da amplitude dos esforços cortantes influenciar diretamente na qualidade dos furos usinados, mostrando que a redução da vibração durante o processo de furação melhora significativamente a qualidade de usinagem.

Os erros de batimento na fixação das brocas, medidos antes de cada ensaio, permite uma correlação com a rugosidade. Pode-se afirmar que esses erros de fixação têm influência (mesmo que pequena) na qualidade dos furos gerados. Isso ocorre porque quando a ferramenta não está bem fixada, apresentando uma inclinação do eixo da broca com relação à direção de avanço, ela irá vibrar mais, com o ponto médio da aresta transversal desenvolvendo um movimento elíptico. Esse fato faz com que o eixo da broca oscile com relação à parede do furo, gerando um perfil de rugosidade mais acentuado e desvios de circularidade do furo. Esse fenômeno também pode estar associado às ondulações secundárias percebidas no perfil da parede do furo, porém esse assunto requer um estudo específico para uma melhor avaliação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, D. O. **“Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Feramentas Revestidas”**. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008.

Balzers **“Catálogo de Produtos G6 Generation”**, Jundiaí, SP, 2006.

Callister Jr., W. D.; Soares, S. M. S.; Miranda, P. E. V. **“Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução”**, LTC editora, 5ª edição, RJ, 2002.

Chiaverini, V. **“Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos”**, 7ª edição, ABM, São Paulo, 2008.

Costa, N.; Machado, N.; Silva, F. S.. **“Influence of Graphite Nodules on Fatigue Limit of Nodular Cast Iron”**, Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol. 20, n.º 1/2, 2008.

Castillo, W. J. G. **“Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal com Canais Retos”**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, Artliber, 8ª edição, 2008.

Gühring **“Die ratiobohrer und ihre praxisgerechte anwendung”**, catálogo do fabricante, Albstadt, Alemanha, 1997.

Klocke, F. **“Manufacturing Processes 1”**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, RWTH edition, 2011.

Marques, F. M. **“Avaliação do Desempenho de Brocas Helicoidais de Aço-rápido Revestidas na Usinagem de Ferro Fundido Nodular GGG50”**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

Massirer Jr., E. “**Usinabilidade de ligas de ferro fundido para aplicação em cabeçotes de motor através de ensaios de furação**”, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2010.

Pereira, A. A. “**Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC25**”. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

Rombaldi, I. A.; Zeilmann, R. P. “**Influência do Acabamento da Broca sobre a Vida na Furação de Ferro Fundido**”, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 10 a 15 Abr., Caxias do Sul, RS, 2011.

Schroeter, R. B. “**Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN 338**”, Florianópolis, SC, 1999.

Schroeter, R. B. “**Otimização do processo de furação e acabamento guias de válvulas**”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Secta Tools, “**Reafiação de ferramentas rotativas, fabricação de ferramentas especiais, otimização de processos**”. Disponível em: <www.sectatools.com.br>. Acesso em: 26/04/2015.

Smith, G. T. “**Cutting Tool Technology: Industrial Handbook**”, Springer, Universitat de Girona, 2008.

Souza, A. J.; Mattes; F. B., Mognaga; G. F. “**Análise dos Esforços de Corte Gerados na Furação de Ferro Fundido DIN GGG50 para Brocas de Metal-duro com Diferentes Microgeometrias**”, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica [Anais do CONEM] 10 a 15 Ago., Uberlândia, MG, 2014.

Stemmer, C. E. “**Ferramentas de corte I**”. Ed. da UFSC, 5ª ed, Florianópolis, SC, 2001.

APÊNDICES

I – Avaliação dos Erros de Batimento na Fixação de Cada Broca

Antes de cada ensaio, o erro de batimento na fixação de cada broca foi medido usando um relógio comparador Digimess (resolução 0,01 mm), Figura A1a. Os resultados podem ser vistos na Tabela A1.

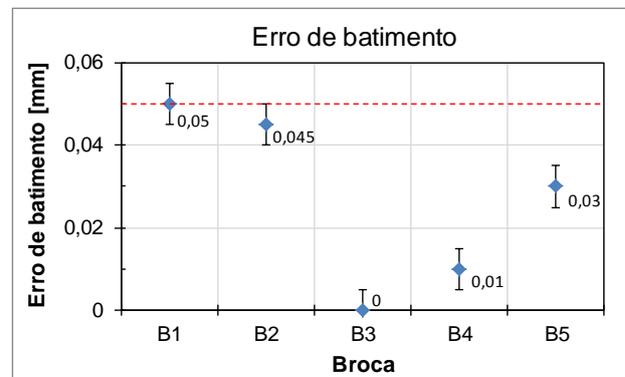
Tabela A1: Erro de batimento na fixação de cada broca.

| | Broca B1 | Broca B2 | Broca B3 | Broca B4 | Broca B5 |
|------------------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------|
| Erro [mm] | 0,050 ± 0,005 | 0,045 ± 0,005 | 0 ± 0,005 | 0,010 ± 0,005 | 0,030 ± 0,005 |

Dado a recomendação de que o erro não ultrapassasse 0,050 mm, todos os valores obtidos foram considerados aceitáveis. Um gráfico gerado com os dados da Tabela A1 pode ser visto na Figura A1b.



(a)

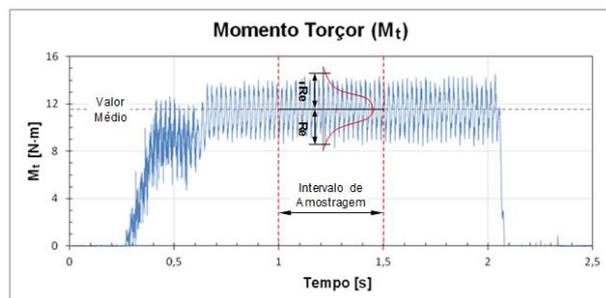


(b)

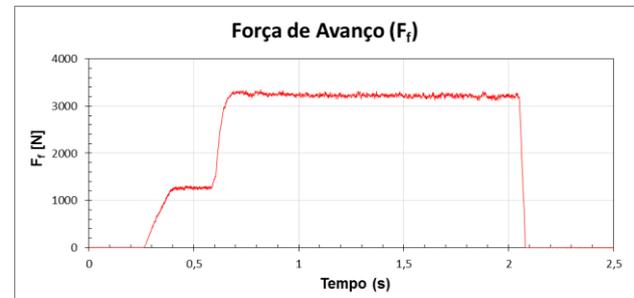
Figura A1: (a) Medição do batimento da fixação da broca através de relógio comparador; (b) Gráfico do erro de batimento por broca com incerteza de medição $\pm 0,005$ mm.

II – Variações dos Esforços de Corte

A Figura A2a ilustra o gráfico do sinal do momento torçor (M_t) enquanto que a Figura A2b mostra o gráfico da força de avanço (F_f), ambos os sinais adquiridos em função do tempo de corte durante a usinagem do Furo 1 ($v_c = 100$ m/min; $f = 0,29$ mm/volta) com a broca B5 (canais retos e ponta detalonada). A variação do momento torçor ($\Delta M_t = Re$) indicada foi usada na correlação com a qualidade dos furos.



(a)



(b)

Figura A2: Gráficos dos esforços de corte em função do tempo de usinagem na geração do Furo 1 com a broca B5: (a) M_t ; (b) F_f .

Neles percebe-se claramente a penetração da broca na amostra, com uma amplitude intermediária, devido ao furo de centro. Após pode-se ver um aumento desta amplitude, pois a furação está em cheio na peça. E finalmente a saída da broca da peça, onde a força de avanço cessa imediatamente, porém o momento torçor ainda oscila devido ao contato da broca nas paredes do furo.

A oscilação característica do sinal de M_t se deve à grande sensibilidade da plataforma piezelétrica na captação de M_t (Canal 1: $-172,3 \text{ pC/N}\cdot\text{m}$) em comparação à sensibilidade bem menor na coleta de dados de F_f (Canal 2: $-3,631 \text{ pC/N}$), que mantém o sinal mais estável.

III – Análise das Ondulações Secundárias na Superfície Usinada

Durante as análises dos perfis de rugosidade gerados pelo software do rugosímetro SJ-201 Tools, notaram-se ondulações secundárias na medição de rugosidade do Furo 2 ($v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,29 \text{ mm/volta}$) com as brocas B1 (helicoidal padrão) e B4 (reta padrão), como mostrado na Figura A3.

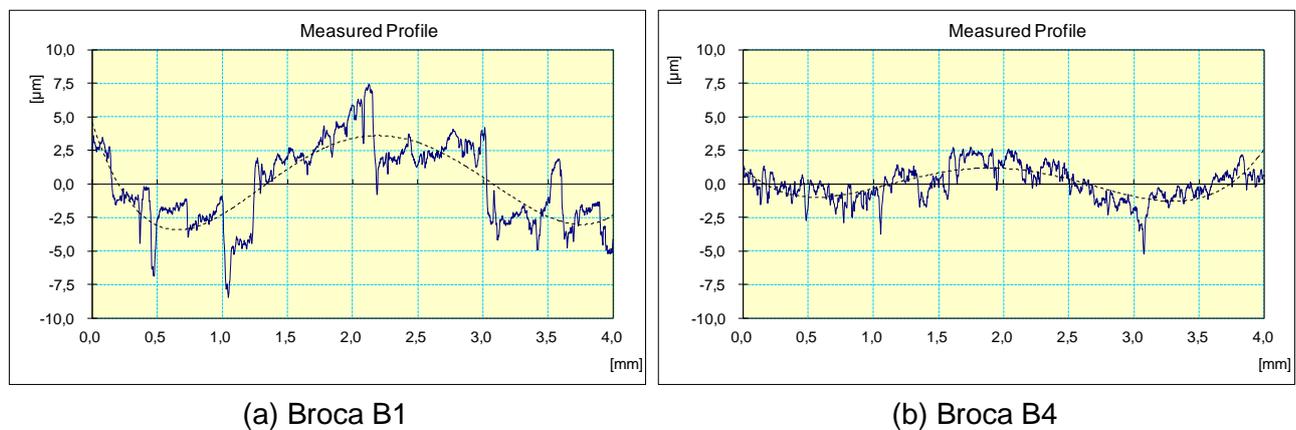


Figura A3: Perfil de rugosidade gerado pelo software do rugosímetro adaptado com a linha de tendência, mostrando a ondulação secundária para o Furo 2 com as brocas: (a) B1; (b) B4.

Conforme descrito em Klocke, 2011, essas ondas secundárias são causadas por influências tanto sistemáticas (quantificadas pela tendência) quanto aleatórias (representadas pela repetibilidade R_e). Pode-se ver que nas condições de corte do Furo 2, por exemplo, a broca B4 (reta padrão) gerou uma ondulação de menor amplitude e menor período que a broca B1 (helicoidal padrão). Isso foi provocado pela diferença geométrica entre elas. Percebeu-se em outro exemplo, analisando a broca B4 para as condições do Furo 11 ($v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,47 \text{ mm/volta}$), que a ondulação secundária apresentou amplitude semelhante, porém período maior que no Furo 2 para a mesma broca, indicando a clara influência do avanço.

ANEXO

A Figura B1 mostra a tabela de comparação de propriedades dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e maleáveis citada por Callister *et al.*, 2002.

| Classe | Número UNS | Composição (%) ^a | Estrutura da Matriz | Propriedades Mecânicas | | | Aplicações Típicas |
|-------------------------------|------------|--|---------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| | | | | Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)] | Limite de Escoamento [MPa (ksi)] | Ductilidade [%AL em 50 mm (2 pol.)] | |
| Ferro Cinzento | | | | | | | |
| SAE G1800 | F10004 | 3,40-3,7 C, 2,55 Si, 0,7 Mn | Ferrita + Perlita | 124 (18) | — | — | Fundições diversas de ferro doce onde a resistência não é uma das principais considerações |
| SAE G2500 | F10005 | 3,2-3,5 C, 2,20 Si, 0,8 Mn | Ferrita + Perlita | 173 (25) | — | — | Pequenos blocos cilíndricos, cabeçotes de cilindros, pistões, placas de embreagem, caixas de transmissão |
| SAE G4000 | F10008 | 3,0-3,3 C, 2,0 Si, 0,8 Mn | Perlita | 276 (40) | — | — | Fundições de motores diesel, revestimentos, cilindros e pistões |
| Ferro Dúctil (Nodular) | | | | | | | |
| ASTM A536 60-40-18 | F32800 | 3,5-3,8 C, 2,0-2,8 Si, 0,05 Mg, <0,20 Ni, <0,10 Mo | Ferrita | 414 (60) | 276 (40) | 18 | Peças que contêm pressão, como os corpos de válvulas e bombas |
| 100-70-03 | F34800 | | Perlita | 689 (100) | 483 (70) | 3 | Engrenagens e componentes de máquinas de alta resistência |
| 120-90-02 | F36200 | | Martensita revenida | 827 (120) | 621 (90) | 2 | Pinhões, engrenagens, cilindros laminadores, peças deslizantes |
| Ferro Maleável | | | | | | | |
| 32510 | F22200 | 2,3-2,7 C, 1,0-1,75 Si, <0,55 Mn | Ferrita | 345 (50) | 224 (32) | 10 | Serviços gerais em engenharia a temperaturas normais e elevadas |
| 45006 | — | 2,4-2,7 C, 1,25-1,55 Si, <0,55 Mn | Ferrita + Perlita | 448 (65) | 310 (45) | 6 | |

Figura B1: Tabela comparativa de propriedades dos ferros fundidos (Callister et al., 2002).